



Bachelorthesis

zum Erlangen des akademischen Grades  
Bachelor of Science Augenoptik

# **Analyse und Bewertung von Temperatur- profilen der handelsüblichen Heißluftgeräte für Augenoptiker**

eingereicht am 28.02.2012

verfasst von Kristin Grewenig  
Studiengang Augenoptik/ Augenoptik und Hörakustik  
Matrikel-Nr.: 28305

Hochschule Aalen – Technik und Wirtschaft  
Betreuer: Prof. Dr. Ulrike Paffrath  
Reinhard Liebhäußner

## **ABSTRACT**

Die Bachelorthesis „Analyse und Bewertung von Temperaturprofilen der handelsüblichen Heißluftgeräte für Augentoptiker“ untersucht die Temperaturen im Erwärmungstopf eines handelsüblichen Heißluftgerätes während der Betriebssituation. Sie hat zum Ziel, die örtliche Temperaturverteilung, den zeitlichen Temperaturverlauf, sowie die Definierbarkeit der Temperatur zu analysieren. Zur Temperaturbestimmung wird an definierten Messpunkten eine direkte Temperaturmessung vorgenommen. Darüber hinaus werden die Ergebnisse bewertet.

In der Studie wurden ein nicht regelbares Heißluftgerät und ein Heißluftgerät mit Temperaturregelung getestet. Ergänzend wurde der Temperatursensor des temperaturregelbaren Heißluftgerätes isoliert auf sein Verhalten untersucht. Zusätzlich wurde die Beeinflussung der Temperaturverteilung durch die Änderung der Luftströmung mit einer geänderten Siebabdeckung gemessen.

Die Temperaturanalyse zeigte deutliche Unterschiede in der örtlichen Verteilung der Temperatur im Erwärmungstopf des Gerätes. Auch im zeitlichen Temperaturverlauf wurden Abweichungen festgestellt. Beides führt zur Einschränkung einer exakten Temperaturvorwahl und somit zur Einschränkung der optimalen Anwendung für den Benutzer. Durch die Verwendung der selbst konstruierten Siebabdeckung konnte zwar eine Veränderung der Temperaturverteilung im Erwärmungstopf erreicht werden, sie führte jedoch nicht zu einer Verbesserung der Situation.

# Inhalt

<b>Abkürzungen und Zeichen.....</b>	<b>IV</b>
<b>Tabellenverzeichnis.....</b>	<b>VI</b>
<b>Abbildungsverzeichnis .....</b>	<b>VII</b>
<b>1 Einleitung.....</b>	<b>1</b>
<b>2 Grundlagen .....</b>	<b>2</b>
2.1 Temperatur und Wärme .....	2
2.2 Kunststoffe für Brillenfassungen.....	3
2.2.1 Formänderungsverhalten von Thermoplasten und Duroplasten .....	3
2.2.2 Eigenschaften von Brillenfassungen aus Kunststoff .....	4
2.2.3 Übersicht der häufig verwendeten organischen Werkstoffe für Brillenfassungen .....	5
2.3 Das Heißluftgerät (allgemein).....	8
2.4 Definitionen.....	9
<b>3 Material und Methode .....</b>	<b>11</b>
3.1 Temperaturmessungen im Heißluftgerät.....	11
3.1.1 Versuchsaufbau .....	11
3.1.2 Datenaufnahme.....	17
3.1.3 Versuchsablauf.....	20
3.1.4 Datenanalyse .....	22
3.2 Widerstandsmessungen der Temperatursensoren.....	23
3.2.1 Versuchsaufbau und Datenaufnahme.....	23
3.2.2 Versuchsablauf.....	25
3.2.3 Datenanalyse .....	25
3.3 Strömungsverhalten im Heißluftgerät .....	26
3.3.1 Versuchsaufbau und -ablauf.....	26
<b>4 Ergebnisse .....</b>	<b>27</b>
4.1 Temperaturmessungen im Heißluftgerät.....	27
4.2 Widerstandsmessungen der Temperatursensoren.....	42
4.3 Strömungsverhalten im Heißluftgerät .....	44
<b>5 Diskussion .....</b>	<b>45</b>
<b>6 Zusammenfassung.....</b>	<b>48</b>
<b>Literatur .....</b>	<b>50</b>
<b>Eidesstattliche Erklärung.....</b>	<b>52</b>

# Abkürzungen und Zeichen

A	Fläche
Aufl.	Auflage
bearb.	bearbeitet
Begr.	Begründer
bspw.	beispielsweise
CA	Celluloseacetat
ca.	circa
CAB	Celluloseacetobutyrat
const.	konstant
CP	Cellulosepropionat
°C	Grad Celsius
D	Durchmesser
Ø	Durchmesser
d. h.	das heißt
DIN	Deutsches Institut für Normung
EP	Epoxidharz
erg.	ergänzte
erw.	erweiterte
et al.	und andere
etc.	et cetera
HLG 1	Heißluftgerät Passat 15 (getestet)
HLG 2	Heißluftgerät Passat 22 (getestet)
Hrsg.	Herausgeber
Hz	Herz
J	Joule
K	Kelvin
l	Länge
max.	maximal
mm	Millimeter
n	Anzahl
neuerarb.	neuerarbeitete
Nr.	Nummer
PA	Polyamid
Q	Wärmemenge
r	Radius
R	Widerstand
s	Sekunden

$s$	Standardabweichung
S.	Seite
s.	siehe
SI	Internationales Einheitensystem
SPX	Co-Polyamid
$t$	Zeit
$\Delta T$	Temperaturdifferenz
TK	Teilkreis
u. a.	unter anderem
überarb.	überarbeitete
USB	Universeller serieller Bus
V	Volt
$\bar{x}$	Mittelwert
z. B.	zum Beispiel
$\alpha$	Längenausdehnungskoeffizient in $K^{-1}$
$\alpha_w$	linearer Wärmeausdehnungskoeffizient in $K^{-1}$
$\vartheta$	Celsius-Temperatur
$\Omega$	Ohm

# Tabellenverzeichnis

Tabelle 2.1: Formelzeichen für Thermodynamik und Wärmeübertragung.....	2
Tabelle 2.2: Eigenschaften von Grilamid TR 90 .....	7
Tabelle 2.3: Thermische Eigenschaften der organischen Fassungswerkstoffe im Überblick .....	8
Tabelle 3.1: Daten der getesteten Heißluftgeräte .....	12
Tabelle 3.2: Technische Daten des verwendeten Multimeters <i>3315 USB</i> .....	13
Tabelle 3.3: Genauigkeit des verwendeten Multimeters <i>3315 USB</i> .....	13
Tabelle 3.4: Angaben zur neuen, selbst hergestellten Siebabdeckung. ....	16
Tabelle 3.5: Technische Daten der Nebelmaschine <i>Mini Fog</i> von <i>American DJ</i> .....	26

# Abbildungsverzeichnis

Abbildung 3.1: Messanordnung der Temperaturmessungen.....	11
Abbildung 3.2: Heißluftgerät mit Temperaturregelung .....	12
Abbildung 3.3: Skizze des Temperaturfühlers .....	14
Abbildung 3.4: Skizze des Erwärmungstopfs mit Messpunkten (Draufsicht) .....	14
Abbildung 3.5: Temperaturmessung im geschlossenen Heißluftgerät .....	15
Abbildung 3.6: Selbst hergestellte Siebabdeckung.....	15
Abbildung 3.8: Nummerierung der Messpunkte .....	17
Abbildung 3.7: Skizze des Erwärmungstopfs (Seitenansicht) .....	17
Abbildung 3.9: Peak Tech 3315 Interface Program .....	18
Abbildung 3.10: Intervallvergleich.....	19
Abbildung 3.11: Messaufbau der Widerstandsmessungen bei 100 °C .....	23
Abbildung 3.12: Widerstand im Wärmeschrank .....	24
Abbildung 4.1: Vergleich von jeweils drei Messpunkten in Ebene 2 und 3 im offenen HLG 1.....	27
Abbildung 4.2: Zeitlicher Temperaturverlauf von T106 im offenen HLG 1 .....	28
Abbildung 4.3: Vergleich des Temperaturverlaufs von offenem und geschlossenem HLG 1.....	28
Abbildung 4.4: Spannweitendiagramm der Temperaturwerte in Ebene 1 (offenes HLG 2) .....	29
Abbildung 4.5: Dreidimensionale Darstellung der Temperaturverteilung in Ebene 1 (offenes HLG 2).....	30
Abbildung 4.6: Spannweitendiagramm der Temperaturwerte in Ebene 2 (offenes HLG 2) .....	30
Abbildung 4.7: Dreidimensionale Darstellung der Temperaturverteilung in Ebene 2 (offenes HLG 2).....	31
Abbildung 4.8: Spannweitendiagramm der Temperaturwerte in Ebene 3 (offenes HLG 2) .....	32
Abbildung 4.9: Dreidimensionale Darstellung der Temperaturverteilung in Ebene 3 (offenes HLG 2).....	32
Abbildung 4.11: „Kreisdiagramm“ mit äußeren Messpunkten zum Vergleich der Ebenen (offenes HLG 2) .....	33
Abbildung 4.10: Skizze der Messpunkte in einer Ebene für die anschließenden „Kreisdiagramme“ .....	33
Abbildung 4.12: „Kreisdiagramm“ mit inneren Messpunkten zum Vergleich der Ebenen (offenes HLG 2).....	34
Abbildung 4.13: Spannweitendiagramm der Temperaturwerte in Ebene 1 (geschlossenes HLG 2). .....	34

Abbildung 4.14: Spannweitendiagramm der Temperaturwerte in Ebene 2 (geschlossenes HLG 2) .....	35
Abbildung 4.15: Spannweitendiagramm der Temperaturwerte in Ebene 3 (geschlossenes HLG 2). .....	36
Abbildung 4.16: Skizze der Messpunkte in einer Ebene für die anschließenden „Schnittdiagramme“ .....	36
Abbildung 4.17: Vertikale Messpunkte zum Temperaturvergleich der Ebenen (geschlossenes HLG 2) .....	37
Abbildung 4.18: Horizontale Messpunkte zum Temperaturvergleich der Ebenen (geschlossenes HLG 2) .....	37
Abbildung 4.19: Vergleich des Temperaturverlaufs von offenem und geschlossenem HLG 2 (vertikale Messpunkte) .....	38
Abbildung 4.20: Vergleich des Temperaturverlaufs von offenem und geschlossenem HLG 2 (horizontale Messpunkte) .....	38
Abbildung 4.21: Spannweitendiagramm der Temperaturwerte in Ebene 1 (offenes HLG 2, selbst konstruierte Siebabdeckung).....	39
Abbildung 4.22: Dreidimensionale Darstellung der Temperaturverteilung in Ebene 2 mit selbst konstruierter Siebabdeckung (offenes HLG 2).....	39
Abbildung 4.23: Temperaturverlauf am Messpunkt T202 bei verschiedenen Temperatureinstellungen (geschlossenes HLG 2) .....	40
Abbildung 4.24: Temperaturverlauf im Messpunkt T210 bei verschiedenen Temperatureinstellungen (geschlossenes HLG 2) .....	40
Abbildung 4.25: Reproduzierbarkeit der Temperaturen .....	41
Abbildung 4.26: Zeitlicher Widerstandsverlauf von Widerstand W01 nach dem Einführen in den Wärmeschränk (100°C).....	42
Abbildung 4.27: Warmwerte des Widerstands W17 im Wärmeschränk (100°C).....	43
Abbildung 4.28: Streuung der Widerstände bei 100 °C.....	43
Abbildung 4.29: Streuung der Widerstände bei 24 °C .....	44



# 1 Einleitung

In den meisten augenoptischen Betrieben werden Heißluftgeräte verwendet, um Brillenfassungen aus Kunststoff zu verglasen und anatomisch anzupassen. Jedoch führt die Erwärmung des Kunststoffs auf diesem Weg oft nicht zum gewünschten Ergebnis. Das Kunststoffmaterial wird in einem engen Temperaturbereich thermoelastisch und somit dehn- und formbar. Gewünscht ist, die zum Bearbeiten notwendige Temperatur im Werkstoff schnell und gleichmäßig zu erreichen. Tatsächlich wird die Temperatur beim Erwärmen mit Heißluftgeräten häufig ungewollt überschritten, sodass das Material z. B. schrumpft oder sich die äußere Schicht verändert. Angaben des Herstellers zu den thermischen Eigenschaften der Kunststoffe sind nur dann hilfreich, wenn die Heißluftgeräte folgende Kriterien erfüllen: Die Temperatur muss für den Anwender definierbar und variierbar sein. Zudem muss eine gleichmäßige örtliche Verteilung der Heißluft im Erwärmungsraum vorliegen.

Das Ziel dieser Arbeit ist es, die Temperaturen im Erwärmungstopf eines temperaturregelbaren Heißluftgeräts zu messen, die erfassten Daten zu analysieren und zu bewerten. Die Firma *Deyle GmbH* hat für die Forschung Heißluftgeräte der Marke *Passat* zur Verfügung gestellt.

Zu Beginn des zweiten Kapitels werden grundlegende Zusammenhänge von Temperatur und Wärme dargestellt. Mit der Erläuterung des für die Versuche gewählten Messverfahrens schließt das Unterkapitel *2.1 Temperatur und Wärme* ab. Es folgt ein Unterkapitel zu den häufig verwendeten organischen Werkstoffen für Brillenfassungen. Fundamentale Eigenschaften der Materialien werden behandelt, u. a. die Erwärmungstemperaturen. Im Anschluss wird der allgemeine Aufbau von Heißluftgeräten erklärt. Das Kapitel schließt mit den Definitionen der wichtigsten Begriffe, die in dieser Arbeit verwendet werden. Das folgende Kapitel *3 Material und Methode* gliedert sich in drei Versuche. Es werden die für die Versuche verwendeten Messmittel und der Versuchsablauf beschrieben. Da es sich bei den Temperaturmessungen um den Hauptversuch handelt, ist dieser Versuch am ausführlichsten dargestellt. Die Widerstandsmessungen der Temperatursensoren und das Strömungsverhalten im Heißluftgerät sind weitere Experimente, die in dieser Arbeit beschrieben werden. Für die Widerstandsmessungen wurden 19 identische Temperaturwiderstände bei zwei unterschiedlichen Temperaturen getestet. Es handelte sich um den für die Regelung im Heißluftgerät verwendeten Temperatursensor. In Kapitel 4 werden die Ergebnisse vorgestellt. Die Einteilung erfolgt wie im vorherigen Kapitel nach den Versuchen. Zum Ende dieser Arbeit werden die Ergebnisse in einer Diskussion beurteilt. Eine Zusammenfassung beschließt die Arbeit.

## 2 Grundlagen

### 2.1 Temperatur und Wärme

Die folgende Betrachtung der Molekularbewegungen von Bohn (2002) zeigt den Zusammenhang von Temperatur und Wärme. Jeder Körper besitzt Moleküle<sup>1</sup>, die Schwingungen ausführen und somit eine bestimmte Energie besitzen. Diese Energie wird in der Einheit Joule angegeben und sagt, wie viel Wärme vorhanden ist. Je mehr Energie zugeführt wird, desto schneller sind die Molekularbewegungen. Dort, wo die Bewegungsenergie der Moleküle gleich Null ist, beginnt die Kelvin-Skala mit Null Kelvin. Vergleicht man die Kelvin-Skala mit der Celsiusskala, so sind  $0\text{ K} = -273,15\text{ °C}$ . Somit steht die Temperatur für die Geschwindigkeit der Moleküle [Boh2002]. Wie Wärme übertragen wird, erklärt die Thermodynamik. Marek und Nitsche (2007) beschreiben Systeme, die einen thermischen Zustand besitzt, der durch die Temperatur gekennzeichnet ist. Sind zwei Systeme im thermischen Gleichgewicht, haben sie dieselbe Temperatur. Weisen sie unterschiedliche Temperaturen auf, liegt kein thermisches Gleichgewicht vor. Wärme (Energie) tritt auf, wenn zwischen den Systemen ein Temperaturunterschied besteht. Sie wird über den Wärmefluss und die Zeit definiert. Dabei fließt der Wärmestrom solange vom Ort höherer Temperatur zum Ort niedriger Temperatur, bis die Systeme dieselbe Temperatur besitzen, sich also ein thermisches Gleichgewicht eingestellt hat. Wird die Temperatur in Abhängigkeit vom Ort dargestellt, spricht man von Temperaturfeldern. Es werden ein-, zwei-, und dreidimensionale Temperaturfelder unterschieden. Bspw. gilt für zweidimensionale Temperaturfelder  $\vartheta = \vartheta(x, y)$ . Bei einem stationären Temperaturfeld ( $\vartheta = \vartheta(\vec{x})$ ) liegt ein zeitunabhängiger Zustand vor. Orts- und zeitabhängige Temperaturfelder werden als instationär bezeichnet [Mar2007].

**Tabelle 2.1: Formelzeichen für Thermodynamik und Wärmeübertragung:** Die Thermodynamische Temperatur ist eine der sieben SI-Basiseinheiten<sup>2</sup>, daneben gibt es die Celsius-Temperatur als abgeleitete SI-Einheit mit besonderem Namen [Nor1994].

	Celsius-Temperatur	Thermodynamische Temperatur	Wärmemenge
Formelzeichen:	$t, \vartheta$	$T, \Theta$	$Q$
SI-Einheit:	°C	K	J

<sup>1</sup> Moleküle sind Verbindungen aus zwei oder mehreren Atomen. Wasser ( $\text{H}_2\text{O}$ ) ist ein dreiatomiges Molekül. Kunststoffe sind Makromoleküle aus vielen tausend Atomen [Che2011].

<sup>2</sup> Das Système International d'Unités (Internationales Einheitensystem) wurde 1960 eingeführt [Phy2011].

Temperaturen zu messen heißt, die gemessene Größe mit einer als Einheit bekannten Größe zu vergleichen [Boh2002]. Mögliche Einheiten der Temperatur sind 1 Kelvin und 1 Grad Celsius (s. Tabelle 2.1). Im Folgenden werden die Temperaturen stets als Celsius-Temperaturen angegeben. Generell erfolgen Temperaturmessungen durch physikalische Effekte oder Zusammenhänge [Hof2007-1]. Es können elektrische Spannung, Ohmscher Widerstand, Druck oder Weg verwendet werden, um Temperaturen zu messen. In der Praxis finden z. B. Thermoelemente, Widerstands- oder Ausdehnungsthermometer Anwendung. Die Thermoelemente sind nicht so genau wie Widerstandsthermometer, dafür haben sie generell eine kleinere Zeitkonstante und ermöglichen eine punktuelle Temperaturmessung [Hof2007-2]. Für die Temperaturmessungen in dieser Arbeit wurde ein Thermoelement verwendet. Zwischen den Thermodrähten entsteht eine nachweisbare Thermospannung, die sich proportional zur absoluten Temperatur der Messstelle verhält [Par2010-1]. In der Praxis wird die Temperatur aus der Differenzmessung von der Temperatur an der Messstelle und der Temperatur an der Vergleichsstelle ermittelt. Für eine genaue Messung muss die Temperatur der Vergleichsstelle konstant gehalten werden [Par2010-2].

## **2.2 Kunststoffe für Brillenfassungen**

Kunststoffe bestehen aus hochmolekularen organischen Verbindungen. Je nach Zusammensetzung und Herstellungsverfahren können sie unterschiedliche Eigenschaften aufweisen. Es werden nach DIN 7724 die polymeren Werkstoffe aufgrund ihres unterschiedlichen mechanischen Verhaltens bei Erwärmung in folgende vier Gruppen eingeteilt: Elastomere, Thermoplastische Elastomere, Thermoplaste und Duroplaste. Die meisten Kunststoffe fallen in die zwei zuletzt genannten Gruppen [Kle1997].

### **2.2.1 Formänderungsverhalten von Thermoplasten und Duroplasten**

Thermoplaste besitzen je nach Temperatur die Zustände: fest, thermoelastisch oder thermoplastisch. Erwärmt man den Werkstoff vom festen zum thermoelastischen Zustand, so nimmt seine Festigkeit stark ab und er lässt sich durch Biegen, Ziehen oder Pressen umformen. Sobald er abkühlt, wird der Kunststoff wieder fest und formstabil. Dabei bleibt die zuvor veränderte Form erhalten. Wird der thermoelastische Zustand überschritten, wie z. B. beim Urformen eines Werkstücks, so wird der Kunststoff zähflüssig. Duroplaste haben im Gegensatz zu den Thermoplasten räumlich vernetzte Moleküle und sind nicht warmformbar. Bei Wärmezufuhr ändern sie ihre Eigenschaften kaum. Festigkeit und Dehnung bleiben über den gesamten Temperaturbereich bis zur Zersetzung des Werkstoffs nahezu gleich [Loo2010, Boh2002].

### 2.2.2 Eigenschaften von Brillenfassungen aus Kunststoff

Die Produzierbarkeit von Kunststoff ist einfach, schnell und preiswert. Eine geringe Dichte und hohe Korrosionsbeständigkeit zählen zu seinen Vorzügen. Von Nachteil ist die geringe Temperaturbeständigkeit. Die meisten Kunststoffe besitzen eine Dauertemperaturfestigkeit von nur 100 °C - 150 °C. Wenige Ausnahmen halten Temperaturen bis 350 °C stand. Ist der Kunststoff über längere Zeit hohen Temperaturen ausgesetzt, beginnt er, sich zu zersetzen. Damit leicht entflammbare Kunststoffe, selbstlöschend oder schwer entzündbar sind, werden diesen Werkstoffen besondere Zusätze beigemischt. Um den Kunststoff biege- und dehnbar zu machen, muss er auf eine materialspezifische Temperatur gebracht werden. Eine Verglasung der Kunststofffassung ist möglich, weil sich das verwendete Material bei Wärme ausdehnt und bei Kälte um den gleichen Betrag wieder zusammenzieht. Die Eigenschaft der Ausdehnung des Werkstoffs bei Wärme hängt neben der chemischen Zusammensetzung vom Formverhalten ab. Thermo- und Duroplaste haben mit  $\alpha_w = 70-110 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$  einen Wärmeausdehnungskoeffizienten, der halb so groß ist wie der von Elastomeren. Für die anatomische Anpassung der Kunststoffbrille ist eine individuelle Verformung des Materials notwendig. Für die Erwärmung von Brillenfassungen ist die Eigenschaft der geringen Wärmeleitfähigkeit von Kunststoff nachteilig. Dass es an den Fassungen dicke und dünne Fassungsteile gibt, erschwert die Erwärmung. Weil die Wärmeenergie nur langsam von außen nach innen weitergeleitet wird, überhitzen dünne Fassungsteile, während dickere Partien noch nicht ausreichend erwärmt sind. Dass sich im Materialinnern genügend Wärme befindet, ohne dass die äußere Schicht überhitzt wird, stellt das Grundproblem der Fassungserwärmung dar [Loo2010, Boh2002].

Wie zuvor erwähnt, dehnen sich Kunststoffe bei Wärme messbar aus. Bohn (2002) berechnet die Längenänderung mithilfe von Ausgangslänge, Temperaturdifferenz und Längenausdehnungskoeffizient des Werkstoffs durch folgende Gleichung:

$$l_1 = l_0 (1 + \alpha \cdot \Delta T)$$

Darin ist  $\Delta T$ ...Differenz zwischen Temperatur  $T_0$  und  $T_1$

$l_0$ ...Ausgangslänge bei Ausgangstemperatur  $T_0$ ;  $l_1$ ...Länge bei Temperatur  $T_1$

$\alpha$ ...Längenausdehnungskoeffizient in der Einheit  $\text{K}^{-1}$  von 0 °C bis 100 °C

Fassungskunststoffe besitzen einen Längenausdehnungskoeffizienten von  $\alpha = 80-150 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ . Das heißt, bei Erwärmung um 100 °C dehnt sich ein 1 m langer Stab aus Fassungskunststoff 8,0 mm bis 15,0 mm aus. Beim Abkühlen zieht er sich um den gleichen Wert wieder zusammen. Grilamid TR 90 besitzt einen Ausdehnungskoeffizienten von  $\alpha_w = 90 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$  (s. Tabelle 2.2) und hat somit die gleiche Wärmeausdehnung wie Epoxidharz [Boh2002].

### **2.2.3 Übersicht der häufig verwendeten organischen Werkstoffe für Brillenfassungen**

Da die Eigenschaften des für Brillenfassungen verwendeten Kunststoffmaterials nicht selbst getestet wurden, hat der Verfasser alle Angaben zu den Werkstoffen bis auf Grilamid TR 90 von Bohn (2002), sowie Look und Bliedtner (2010) übernommen.

Seit 1960 sind in der Brillenfassungsherstellung zu den ersten Materialien Celluloid und Celluloseacetat viele weitere Kunststoffe hinzugekommen. Im Folgenden werden drei gegenwärtig eingesetzte Fassungswerkstoffe, die auf der Umwandlung von dem Naturstoff Cellulose basieren, beschrieben.

#### Celluloseacetat (CA)

Beim Celluloseacetat handelt es sich um einen Ester aus Cellulose und Essigsäure, dem Weichmacher und Additive (Pigmente, Farben, etc.) beigelegt wurden. Das CA ist ein thermoplastischer Kunststoff. Ab einer Temperatur von 180 °C beginnt es, sich zu zersetzen. Sein thermoelastischer Zustand liegt bei 80 °C – 100 °C. Vereinzelt wird die Biegetemperatur in einem Bereich von nur 50 °C – 60 °C erreicht. Der Werkstoff hat ein geringes Schrumpfverhalten und ein wiederholtes Erwärmen ist gut möglich. Eine hohe Festigkeit und Schlagzähigkeit kennzeichnen das Material im festen Zustand. Da das CA bei dünnen Fassungen eine grenzwertige Stabilität aufweist, kam ein Werkstoff mit größerer Kugeldruckhärte und höherer Streckspannung namens HD3-Acetate auf den Markt. In der Fassungsherstellung findet das CA Verwendung als Blockacetat, extrudiertes oder gespritztes Acetat. Den größten Anteil am Markt hat das extrudierte Acetat. Für die Herstellung von Blockacetat wird den Rohstoffen ein Lösungsmittel zugegeben, um die homogene Masse anschließend in einem Walzwerk auswalzen zu können. Ein Block entsteht aus mehreren aufeinandergelegten Platten, die bei etwa 100 °C und hohem Druck verschweißt werden. Je nachdem wie die Platten aufeinander geschichtet wurden und wie häufig der Vorgang wiederholt wurde, entstehen Muster für z. B. Horn- oder Schildpatt-Imitate. Anders entstehen extrudierte Platten. Das verwendete Granulat enthält kein Lösungsmittel. Es wird in Extrudermaschinen eingezogen, eingeschmolzen und unter hohem Druck in meist rechteckigen Plattenprofilen ausgestoßen. Die entstandenen Tafeln werden wie das Blockacetat mit spanenden Werkzeugen zu Mittelteilen und Bügeln weiterverarbeitet. Ein kostengünstigeres Verfahren ist das Spritzen von Acetat zu Spritzgussfassungen. Nachteilig sind innere Spannungen im Material, die beim Erwärmen zu Falten oder Runzeln führen können.

#### Cellulosepropionat (CP)

Die Veresterung von Cellulose, Propionsäure und Additiven ergibt das CP. Propionatfassungen sind seit etwa 1976 auf dem Markt. Kennzeichnend für den Thermoplast sind eine höhere mechanische Festigkeit auch bei größeren Temperaturen und eine höhere Zähigkeit. Generell erreicht das Material seinen thermoelastischen Bereich bei einer Temperatur von 80 °C – 115 °C. Die Zersetzung tritt ab 180 °C ein. Je nach Härtegrad

des Werkstoffs sind deutliche Abweichungen möglich. Hergestellt werden die Fassungsteile (Mittelteil und Bügel) meist aus Spritzguss. Propionat hat ein Schrumpfverhalten von annähernd Null und die Wiederholbarkeit der Verglasung ist gut möglich.

#### Celluloseacetobutyrat (CAB)

CAB entsteht, wenn Cellulose mit Essig- und Buttersäure verestert wird. Es ist ein Thermoplast, der ähnliche Eigenschaften wie das Cellulosepropionat besitzt: hohe Härte, Zähigkeit und hohe Festigkeit. Seine Wärmeformbeständigkeit ist besser als die von CP. In einem Temperaturbereich von 80 °C – 120 °C erweicht das Material. Aus Celluloseacetobutyrat werden komplette Brillenfassungen oder Bügelenden hergestellt.

Während der Kunststoff auf Cellulose-Grundlage durch Veresterung (Depolymerisation) gewonnen wird, kommen in der synthetischen Herstellung drei Polyreaktionsverfahren zum Einsatz: Polymerisation, Polykondensation, oder Polyaddition. Es handelt sich bei allen Verfahren um eine Aufbaureaktion von Monomeren (kleinen Molekülen) zu Makromolekülen. Dies geschieht unter hohem Druck und Wärmezufuhr. Die Molekülketten bestehen aus Kohlenstoffatomen, die Verbindungen mit Sauerstoff-, Schwefel-, Wasserstoff- und Stickstoffatomen eingehen können.

#### Polyamid (PA)

Bei Polyamid handelt es sich um ein durch Polykondensation erzeugtes Polymer mit thermoplastischem Verhalten. Der Temperaturbereich, in dem sein Zustand von fest nach sehr weich übergeht, ist bedeutend kleiner als beim CP und CA. Die Umformtemperatur beträgt 100 °C – 110 °C. Bei Überwärmung und vorsichtiger Erwärmung auf 110 °C beginnt das Material zu schrumpfen. Sobald die Fassung aus der Warmluft genommen wird, erlangt das PA seine Festigkeit. Deshalb werden Bügel einer Polyamid-Fassung mit Metalleinlagen versehen, um eine Anpassung möglich zu machen. Aufgrund seiner extremen Bruchsicherheit, Härte und Festigkeit wird PA auch für Sport- und Arbeitsschutzbrillen eingesetzt. Die Polyamid-Fassungen entstehen hauptsächlich im Spritzgussverfahren.

#### Co-Polyamid (SPX)

Die Entwicklung der Polyamid-Variante erfolgte speziell für Brillenfassungen. Neben den typischen Eigenschaften von PA besitzt SPX eine geringe Dichte, hohe Flexibilität, Oberflächenhärte, hohe UV-Beständigkeit und ein selbstlöschendes Flammverhalten. Es wird wie das PA in einem engen Temperaturbereich sehr weich. Das hochelastische Material kann bereits bei Temperaturen von 50 °C – 80 °C verglast werden. Die Verarbeitung des Kunststoffs zu Fassungen erfolgt ebenfalls durch das Spritzgießen.

#### Epoxidharz (EP)

Kennzeichnend für Epoxidharze sind seine hohe Härte, geringe Dichte, sehr hohe Wärmeformbeständigkeit und hohe Kratzfestigkeit. Die Fertigung erfolgt durch Polyaddition, wobei die Kunststofffassungsteile gegossen werden. Der duroplastische Kunststoff sollte nicht unter einer Temperatur von 80 °C verformt werden. Optimale Erwärmungs-

temperaturen sind 100 °C – 130 °C. Charakteristisch für EP ist sein Formänderungsverhalten. Die Form bleibt nur erhalten, wenn das zu verändernde Fassungsstück, während es abkühlt, in dieser Umformung festgehalten wird. Sobald eine wiederholte Erwärmung über 80 °C erfolgt, geht das Material wieder in seine Ursprungsform zurück. Dieses Verhalten, das als „Memory-Effekt“ bezeichnet wird, ist vorteilhaft für das Verglasen, erschwert jedoch das Anpassen der Brillenfassung. Die Zersetzung des Materials tritt erst ab Temperaturen über 350 °C ein [Boh2002, Loo2010].

#### Grilamid TR 90

Bei Grilamid TR 90 handelt es sich um einen sehr leichten Kunststoff. Alle Angaben, einschließlich der Tabelle 2.2, sind dem Sicherheitsdatenblatt des Exporteurs *Wenzhou Sky & Sea International Economy & Trade Co., LTD* entnommen. Der Werkstoff, ein thermoplastisches Polyamid, besitzt extrem hohe Bruchsicherheit und Formstabilität. Seine helle Eigenfarbe ist deckend oder transparent einfärbbar. Das Material weist eine gute Beständigkeit gegenüber Chemikalien und Spannungsrissen auf. Die Verarbeitung zu Brillenfassungen erfolgt durch das Spritzgießen. Weitere Eigenschaften des Materials zeigt die Tabelle 2.2.

**Tabelle 2.2: Eigenschaften von Grilamid TR 90**

Dichte	1,00 g/cm <sup>3</sup>
Reißfestigkeit	45 MPa
Streckspannung	60 MPa
Kerbschlagzähigkeit	13 kJ/m <sup>2</sup> (23 °C) 12 kJ/m <sup>2</sup> (-30 °C)
Kugeldruckhärte	90 MPa
Schlagzähigkeit	ohne Bruch
Wasseraufnahme	3 %
Glasübergangstemperatur <sup>3</sup>	155 °C
Wärmeformbeständigkeitstemperatur HDT/A <sup>4</sup>	115 °C
Wärmeformbeständigkeitstemperatur HDT/B <sup>5</sup>	135 °C
Thermischer Ausdehnungskoeffizient (längs und quer)	0,9 · 10 <sup>-4</sup> /K
Maximale Gebrauchstemperatur (langfristig)	80-100 °C
Maximale Gebrauchstemperatur (kurzfristig)	120 °C
Lineare Verarbeitungsschwindung (längs)	0,65 %
Lineare Verarbeitungsschwindung (quer)	0,75 %

<sup>3</sup> [Nor2009]; s. 2.4 Definitionen.

<sup>4</sup> Methode A verwendet eine nominelle Randfaserspannung von 1,80 MPa [Nor1996].

<sup>5</sup> Bei Methode B wird eine nominelle Randfaserspannung von 0,45 MPa benutzt [Nor1996].

Abschließend sind die Erweichungstemperaturen der Kunststoffe für Brillenfassungen in der Tabelle 2.3 dargestellt, wie sie Look und Bliedtner (2010) formulieren.

**Tabelle 2.3: Thermische Eigenschaften der organischen Fassungswerkstoffe im Überblick [Loo2010]**

	Erweichungstemperatur in °C	Formänderungsverhalten
Celluloseacetat (CA)	80-100	thermoplastisch
Celluloseacetobutyrat (CAB)	80-120	thermoplastisch
Cellulosepropionat (CP)	80-115	thermoplastisch
Polyamid (PA)	80-120	thermoplastisch
Co-Polyamid (SPX)	50-80	thermoplastisch
Epoxidharz (EP)	80-100	duroplastisch

Alle genannten Materialien bis auf Epoxidharze haben ein thermoplastisches Formänderungsverhalten. Die Temperaturgrenzen, die zum Erweichen der Werkstoffe benötigt werden, sind minimal 50 °C und maximal 120 °C. Bis auf Co-Polyamid werden alle beschriebenen Kunststoffe bei einer Temperatur von 90 °C bis 100 °C biege- und dehnbar. Wie bereits erwähnt, können sich jedoch je nach Zusätzen im Material die Temperaturbereiche deutlich verschieben.

## 2.3 Das Heißluftgerät (allgemein)

Laut Bohn (2002) werden in Deutschland Brillenfassungen fast ausschließlich durch Heißluft erwärmt. Das Glaskugelbad stellt eine alternative Erwärmungsform dar. Andere Möglichkeiten sind Wasserbad- oder Infraroterwärmung.

Bohn (2002) beschreibt auch den Aufbau und die Funktionsweise des Heißluftgeräts. Zu einem handelsüblichen Heißluftgerät gehören als wesentliche Bauelemente ein Gehäuse mit einem Erwärmungstopf, ein Motor mit Ventilator, ein Heizelement und eine Temperaturregelung. Es funktioniert nach folgendem Prinzip: Die kalte Raumluft wird durch das Heizelement erwärmt. Ein Ventilator sorgt für den Transport der Warmluft zur Fassung. Die kalte Kunststofffassung wird im Erwärmungstopf von der heißen Luft umströmt und nimmt einen Teil der Wärmeenergie auf. Ein Einsetzen der Gläser in die Fassung ist erst nach der Entnahme der Fassung aus dem heißen Erwärmungsraum möglich. Da der Kunststoff sehr schnell abkühlt, werden in der Regel die gerandeten Gläser nacheinander in die Fassung eingesetzt. Deshalb haben viele Heißluftgeräte einen Erwärmungstopf, der nur für eine halbseitige Fassung ausreicht. Zum Antrieb des Ventilators kommen meist Kurzschlussläufermotore oder Spaltnmotore zum Einsatz. Für das Ventilatorrad ist ein Radial- oder Tangentialgebläse oder aber eine Mischform möglich. Während das Radialgebläse ähnlich einem Propeller mit mehreren Flügeln geräusch- und vibrationsarm läuft, ist das Tangentialgebläse lauter, sowie leistungsschwächer. Bei der Mischform schleudern schräge Lamellen die Luft nach außen. Das Heiz-



element besteht aus spiralförmig aufgewickeltem Heizdraht, sogenannten Heizwendeln. Mithilfe des Ohmschen Widerstands wird ein Teil der elektrischen Energie in Wärmeenergie umgewandelt. Erhitzt sich der Draht, fangen die Heizwendel an zu glühen.

Es gibt sehr einfache Geräte ohne Temperatursteuering und solche, die eine Temperatursteuering durch Thermostate besitzen. In besseren Geräten lässt sich die Temperatur durch einen eingebauten Temperatursensor regeln. Je nach Gerät gibt es die Möglichkeit, die Luft aus dem Erwärmungstopf frei nach oben ausströmen zu lassen oder den Topf mit einem Deckel zu schließen, um die Wärme aufzustauen [Boh2002].

## 2.4 Definitionen

**Messen** heißt, mit einer Maßverkörperung den Wert einer physikalischen Größe quantitativ zu ermitteln [Hof2007-3]. „Eine Maßverkörperung ist ein Gegenstand, welcher einen Größenwert repräsentiert.“ [Pes2009] So ist nach Bohn (2002) ein Strichmaßstab (z. B. Lineal) ein für Längenmessungen verwendetes Messgerät mit Maßverkörperung. Ein weiteres Beispiel für eine Maßverkörperung ist ein Quecksilberthermometer. Die Flüssigkeit ändert ihr Volumen durch den Einfluss der Temperatur, sodass je nach Flüssigkeitsstand die Temperatur an einer Skala abgelesen werden kann [Boh2002]. Nach DIN 19226 gelten folgende Definitionen: „Das **Steuern** – die **Steuerung** – ist ein Vorgang in einem System, bei dem eine oder mehrere Größen als Eingangsgrößen andere Größen als Ausgangsgrößen aufgrund der dem System eigentümlichen Gesetzmäßigkeit beeinflussen.“ „Das **Regeln** – die **Regelung** – ist ein Vorgang, bei dem eine Größe, die zu regelnde Größe (Regelgröße), fortlaufend erfasst, mit einer anderen Größe, der Führungsgröße, verglichen und im Sinne einer Angleichung an die Führungsgröße beeinflusst wird.“ [Kle1997] „*Thermostate* sind Konstanthalter für die Regelgröße Temperatur [...]“ [Kas1984-1] Bei einem **Zweipunktregler** handelt es sich um einen unstetigen Regler, dessen Regelgröße zwischen Ein- und Ausschaltpunkt pendelt. Typisch für den Regler sind die Schwankungen des Istwertes um einen Sollwert. Die Intervallhöhe wird als *Schwankungsbreite* bezeichnet [Kas1984-2]. Man definiert die *Überschwingweite* als größte vorübergehende Sollwertabweichung [Hei2005-2]. Der über das Ohmsche Gesetz definierte **Ohmsche Widerstand** ist ein elektrischer Leiter, der dem Stromfluss des elektrischen Stromkreises einen Widerstand entgegensetzt. Für den Widerstand wird die SI-Einheit  $[R] = \Omega$  (Ohm) verwendet. Zwischen der Spannung  $U$  und dem Strom  $I$  besteht eine Proportionalität. Es gilt folgender Zusammenhang:  $R = \frac{U}{I} = \text{const.}$  Diese Proportionalität gilt annähernd für metallische Leiter. **Heißleiter** verhalten sich nicht wie Ohmsche Widerstände [Hof2007-4]. Die Eigenleitfähigkeit nimmt mit der Temperatur zu [Hof2007-2]. Nach DIN-Norm wird der Übergang in einem amorphen<sup>6</sup> Werkstoff von einem viskosen oder gummiartigen Zustand zu einem festen Zustand als

---

<sup>6</sup> Der Molekülaufbau von amorphen Werkstoffen (z. B.: Glas) ist gestaltlos. Kristalline Werkstoffe (z. B.: Metall) hingegen haben Moleküle mit bestimmter, gesetzmäßiger Anordnung [Boh2002].

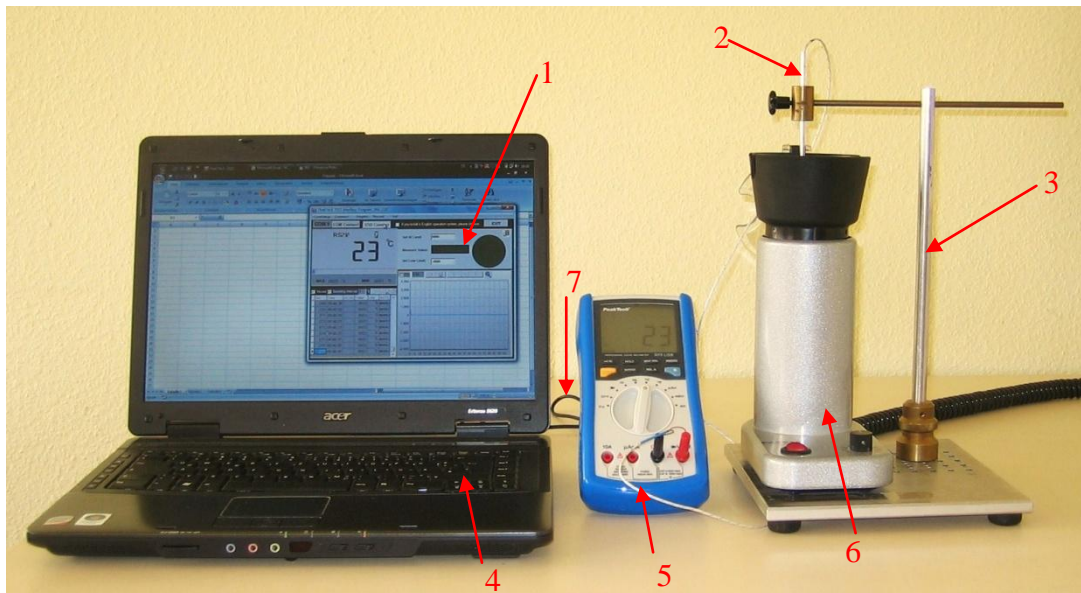
**Glasübergang** bezeichnet. Die physikalische Veränderung ist umkehrbar. Allgemein erfolgt der Glasübergang in einem engen Temperaturbereich. Der Mittelpunkt des Temperaturbereichs wird als **Glasübergangstemperatur** angegeben [DIN1997].

## 3 Material und Methode

### 3.1 Temperaturmessungen im Heißluftgerät

#### 3.1.1 Versuchsaufbau

Die Abbildung 3.1 zeigt die Anordnung der verwendeten Messmittel. Zur Temperaturmessung kamen ein Multimeter und ein Thermoelement zum Einsatz. Für die Datenaufnahme wurde ein PC mit entsprechender Software benutzt. Das Heißluftgerät war auf einer Messstation positioniert. Die Temperaturen wurden ausschließlich im Erwärmungstopf des Heißluftgeräts gemessen.



**Abbildung 3.1: Messanordnung der Temperaturmessungen:** Das Heißluftgerät war auf einer Messstation justiert. Der am Multimeter angeschlossene Temperaturfühler befand sich im Erwärmungstopf. Das Multimeter war durch eine USB-Schnittstelle mit einem PC verbunden. Der Funktionswahlschalter des Multimeters stand auf Grad Celsius.

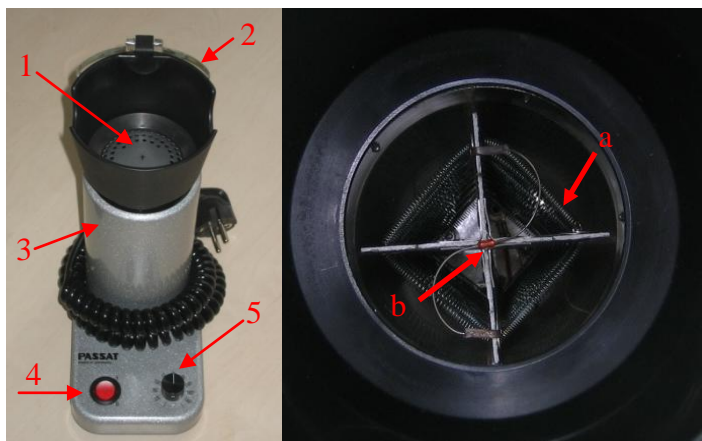
- |                                    |                      |                   |
|------------------------------------|----------------------|-------------------|
| (1) PeakTech3315 Interface Program | (2) Temperaturfühler | (3) Messstation   |
| (4) Computer                       | (5) Multimeter       | (6) Heißluftgerät |
| (7) USB-Schnittstellenkabel        |                      |                   |

### Heißluftgeräte (getestet)

Getestet wurden zwei Heißluftgeräte der Marke *Passat* von der Firma *Deyle GmbH* (s. Tabelle 3.1). Das Heißluftgerät Passat 15 (HLG 1) wird lediglich durch einen Ein/Aus-Schalter bedient. Das Heißluftgerät Passat 22 (HLG 2) ermöglicht zusätzlich eine für den Benutzer stufenlose Einstellung der Temperatur. Die Temperaturskala enthält: 75 °C, 90 °C, 100 °C, 110 °C, 120 °C, 130 °C, 140 °C, 160 °C, 180 °C. Im HLG 2 strömt die vom Boden des Geräts angesaugte Umgebungsluft entlang der Heizspirale nach oben und tritt am Temperatursensor vorbei durch die Öffnungen der Siebabdeckung in den Erwärmungstopf. Die Siebabdeckung dient der Kanalisierung des Luftstroms. Durch das Schließen des am Gerät befindlichen transparenten Deckels besteht zusätzlich die Möglichkeit, die Warmluft im Erwärmungstopf aufzustauen. Der zur Temperaturregelung notwendige Temperatursensor befindet sich zwischen der Heizspirale und der Siebabdeckung (s. Abbildung 3.2). Es handelt sich um einen Zweipunktregler.

**Tabelle 3.1: Daten der getesteten Heißluftgeräte**

	Heißluftgerät ohne Temperaturregelung	Heißluftgerät mit Temperaturregelung
Typ	Passat 15	Passat 22
Serien-Nr.	043784	043785
Technische Daten	Spannung: 240 V $\approx$ , Anschluss- wert: max. 300 Watt	Spannung: 240 V $\approx$ , Anschluss- wert: max. 300 Watt



**Abbildung 3.2:**

#### **Heißluftgerät mit Temperaturregelung:**

- (1) Siebabdeckung
- (2) Erwärmungstopf mit Deckel
- (3) Gehäuse
- (4) Ein/Aus-Schalter
- (5) Drehknopf für Temperatureinstellungen

#### **Blick ins Innere des Heißluftgeräts (Draufsicht):**

- (a) Heizspirale
- (b) Temperatursensor (Widerstand)

## Digitales Multimeter

Bei allen Messungen kam das digitale Multimeter *3315 USB* der Firma *PeakTech* zum Einsatz. Es hatte eine RS-232 C und USB Schnittstelle für die Kommunikation mit einem Computer. Wurde diese Schnittstelle benutzt, musste am Multimeter die serielle Schnittstelle RS-232 C eingeschaltet werden. Der Funktionswahlschalter des Messgeräts befand sich auf „°C“. Aus Tabelle 3.2 ist die Messfolge ersichtlich. Es fand zweimal pro Sekunde eine Messung statt. Das Multimeter besaß eine 3 ¾ - stellige LCD-Anzeige. Die Messgenauigkeit des Multimeters betrug für einen Temperaturbereich von 0 °C – 400 °C  $\pm 1\% + 7$  St. (s. Tabelle 3.3). Alle Angabe zum Gerät, einschließlich der Tabellen 3.2 und 3.3, sind der Bedienungsanleitung des Geräts entnommen.

**Tabelle 3.2: Technische Daten des verwendeten Multimeters 3315 USB**

Anzeige	3 ¾ - stellige 25 mm LCD-Anzeige mit automatischer Polaritätsumschaltung, max. Anzeige: 3999
Messfolge	2 x pro Sekunde
Betriebstemperaturbereich	5 °C ... + 40 °C
Lagertemperaturbereich	- 10 °C ... + 50 °C
Temperaturbereich für Genauigkeit	+ 18 °C ... 28 °C < 70% RH
Spannungsversorgung	9 V - Batterien

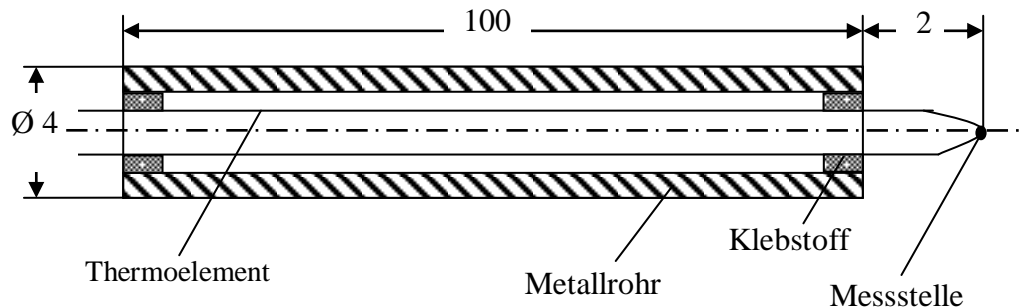
**Tabelle 3.3: Genauigkeit des verwendeten Multimeters 3315 USB**

Messfunktionen für Temperaturmessungen			
Bereich	Auflösung	Genauigkeit	
- 40 °C ~ 1000 °C	1 °C	- 40 °C ~ 0 °C	$\pm 3\% + 9$ St.
		0 °C ~ 400 °C	$\pm 1\% + 7$ St.
		400 °C ~ 1000 °C	$\pm 2\% + 10$ St.

## Thermoelement

Zum Messen der Temperatur wurde ein Thermoelement benutzt (s. Abbildung 3.3). Es bestand aus zwei Drähten der Materialien Eisen und Konstantan, die an der Messstelle miteinander verbunden waren. Der Temperaturfühler hatte eine Gesamtlänge von 1000 mm. Das 100 mm lange Metallrohr mit frei liegender Messstelle befand sich während der Messung senkrecht im Erwärmungsraum des Heißluftgeräts. Die freien Enden führten zum auswertenden Multimeter. Durch die Temperaturdifferenzen zwischen der heißen und kalten Verbindungsstelle existierte eine Thermospannung [Hof2007-5]. Diese elektrische Spannung wurde als digitaler Temperaturwert in der über den Funktionswahlschalter eingestellten Einheit Grad Celsius auf dem Display des Multimeters angezeigt. Heinrich et al. (2005) schildern, dass die entstehende Thermospannung und die Temperatur am Fühler eine lineare Abhängigkeit aufweisen. Ein Eisen-Konstantan Thermoelement hat eine Konstante von  $K_{FeKo} = 5,37$  mV/100 °C. Die Messgenauigkeit

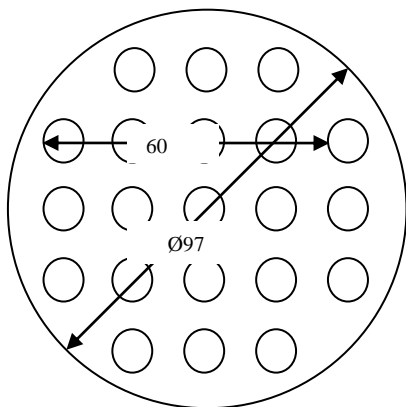
von Thermoelementen liegt bei etwa  $\pm 1,5 \%$ . Es ist in der Ansprechgeschwindigkeit den Widerstandsthermometern weit überlegen [Hei2005-1].



**Abbildung 3.3: Skizze des Temperaturfühlers:** Das Thermoelement war aus Eisen- und Konstantan-Thermodraht zusammengesetzt. Die Messstelle lag frei. Alle Größen sind Millimeterangaben.

### Messstation

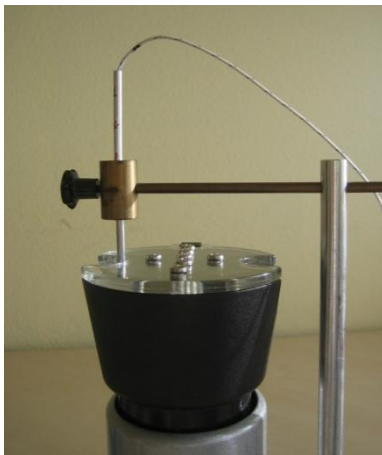
Die gegebene Messstation (s. Abbildung 3.1) bestand aus einem Metalltisch und einer Halterung für den Temperaturfühler. Sie bot insgesamt 25 Messpunkte, die in einem Abstand von 15 mm auf einer Fläche von 60 mm x 60 mm angeordnet waren. Die vier äußersten Messpunkte wurden nicht benutzt. Das Stecksystem ermöglichte die Einstellung von 21 Messpunkten, da der Erwärmungstopf des Heißluftgeräts einen Durchmesser von 97 mm maß (s. Abbildung 3.4). Das Heißluftgerät wurde zu jeder Messung so justiert, dass stets dieselbe Raumverteilung der Messpunkte in dem Erwärmungsraum vorzufinden war. Die Zentrierung des Heißluftgeräts zur Messstation erfolgte mithilfe einer Kreuzmarkierung an der Siebabdeckung, die zuvor mittig auf diese gezeichnet worden war. Das Heißluftgerät war richtig positioniert, wenn der zentrale Messpunkt genau in der Mitte des Geräts lag.



**Abbildung 3.4: Skizze des Erwärmungstopfs mit Messpunkten (Draufsicht):** Der Erwärmungstopf maß einen Durchmesser von 97 mm. Die 21 Messpunkte waren regelmäßig im Erwärmungstopf verteilt.

### **Präparierter Deckel für Messungen mit geschlossenem Deckel**

Da die Messstation weiterhin verwendet wurde, waren Bohrungen in den Kunststoffdeckel des Heißluftgeräts notwendig, um Messungen bei geschlossenem Erwärmungstopf durchführen zu können. Obschon die Bohrlöcher während der Messung abgedichtet wurden, sollte so wenig wie möglich am tatsächlichen Zustand verändert werden. Die Idee einer symmetrischen Punkteverteilung über die Mitte wurde verwirklicht. Folglich besaß der bearbeitete Deckel sieben Bohrungen, wobei die Öffnungen rechts und links im Deckel für die äußeren Messpunkte genutzt und somit Temperaturen an neun Messpunkte gemessen und verglichen wurden (s. Abbildung 3.5).



**Abbildung 3.5: Temperaturmessung im geschlossenen Heißluftgerät:** Der Temperaturfühler befand sich hier an der Messstelle T309. Schrauben schlossen die Bohrlöcher.

### **Selbst hergestellte Siebabdeckung mit veränderten Öffnungen**

Aufgrund der beobachteten geringeren Temperaturwerte an zentralen Messpunkten wurde eine Siebabdeckung mit auf der Abdeckungsfläche gleichmäßig angeordneten Öffnungen hergestellt (s. Abbildung 3.6). Diese sollten eine bessere Temperaturverteilung im Erwärmungstopf erzielen. Im Idealfall hätte jeder Messpunkt denselben Temperaturmittelwert.



**Abbildung 3.6: Selbst hergestellte Siebabdeckung:** Schräge Rückansicht (links) und eingesetzt im Heißluftgerät (rechts).

Für die Anfertigung der neuen Siebabdeckung wurde spezielles, leicht bearbeitbares Aluminium verwendet. Die genaue Planung und Herstellung der neuen Abdeckung ermöglichte einen einfachen Wechsel der Siebabdeckungen. Entworfen wurde eine Abdeckung mit 110 Löchern auf sechs Teilkreisen (TK). Die für jeden Teilkreis bestimmte Lochanzahl ist in Tabelle 3.4 ersichtlich. Die gesamte Lochfläche der vorhandenen Abdeckung sollte, da keine Veränderung an der austretenden Luftmenge erwünscht war, in etwa mit der neuen Öffnungsfläche übereinstimmen. Um den neuen Lochdurchmesser zu bestimmen, wurden folgende Schritte überlegt:

$$A_{\text{alt}} = \text{Anzahl der Löcher} \cdot \pi \cdot r_{\text{alt}}^2$$

$$A_{\text{alt}} = 75\pi \cdot \frac{2,8^2}{4} \text{ mm}^2 \approx 462 \text{ mm}^2$$

$$D_{\text{neu}} = 2,3 \text{ mm} \Rightarrow r_{\text{neu}} = 1,15 \text{ mm} \Rightarrow A_{\text{neu}} \approx 457 \text{ mm}^2$$

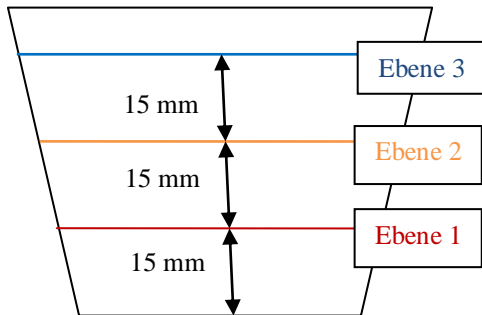
**Tabelle 3.4: Angaben zur neuen, selbst hergestellten Siebabdeckung:** Für jeden Teilkreis wurde die Anzahl der Löcher so bestimmt, dass sich ungefähr gleichgroße Bohrungsabstände ergaben.

	Durchmesser (mm)	Lochanzahl	Bohrungsabstand (mm)
TK 1	50	36	4,4
TK 2	40	28	4,5
TK 3	30	22	4,3
TK 4	20	15	4,2
TK 5	10	8	4,0
TK 6	0	1	-



### 3.1.2 Datenaufnahme

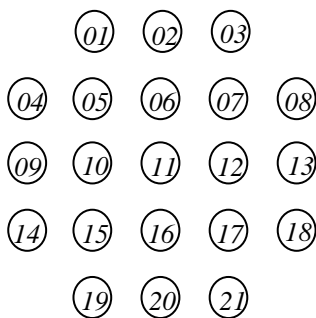
Da der Erwärmungstopf eine Tiefe von ca. 50 mm aufwies, wurde der Erwärmungsraum in drei Ebenen geteilt, um so ein genaueres Temperaturprofil zu erhalten. Die Ebene 1 wurde mit 15 mm Entfernung zur Siebabdeckung gemessen, die Ebene 2 mit 30 mm Abstand und Ebene 3 mit einem Abstand von 45 mm (s. Abbildung 3.7).



**Abbildung 3.7: Skizze des Erwärmungstopfs (Seitenansicht):** Die Temperaturen wurden in drei Ebenen gemessen.

Die Messstelle des Temperaturfühlers befand sich während der Messung in Ebene 1, 2 oder 3 an einem der 21 Messpunkte. Die Messpunkte wurden von 01 bis 21 durchnummeriert (s. Abbildung 3.8). Wobei es sich bei der Zahl vor der Nummer um die Angabe der Ebene handelt:

z. B.: T211: Temperatur am Messpunkt 11 in Ebene 2  
T301: Temperatur am Messpunkt 01 in Ebene 3



**Abbildung 3.8: Nummerierung der Messpunkte:** Die 21 Messpunkte wurden in der dargestellten Reihenfolge nummeriert. Dabei lag Messpunkt 11 im Zentrum, Messpunkt 10 in der mittleren Peripherie und Messpunkt 09 am Rand des Erwärmungstopfs.

Bei den Messungen im Heißluftgerät ohne Temperaturregelung wurden die Daten manuell erfasst. D. h., die Werte wurden erst in einem Laborbuch notiert und anschließend in eine Excel-Tabelle übertragen.

## Software

Für die Temperaturmessungen im temperaturregelbaren Heißluftgerät stand die Software *PeakTech 3315 Interface Program* der Firma *PeakTech* zur Verfügung, die die Werte automatisch erfasste und tabellarisch ordnete. Der Anschluss zwischen Multimeter und Computer erfolgte über eine Infrarotschnittstelle am Messgerät und ein USB-Schnittstellenkabel. Für die Verbindung herzustellen, wurde am Multimeter die RS-232 C Schnittstelle aktiviert. Sobald in der Software „USB Connect“ angeklickt wurde, begann die Datenaufnahme im eingestellten Intervall. Kleinstes mögliches Intervall war eine Datenaufnahme pro Sekunde. Jedem Messwert wurden eine Zeit und Nummer zugeordnet (s. Abbildung 3.9).

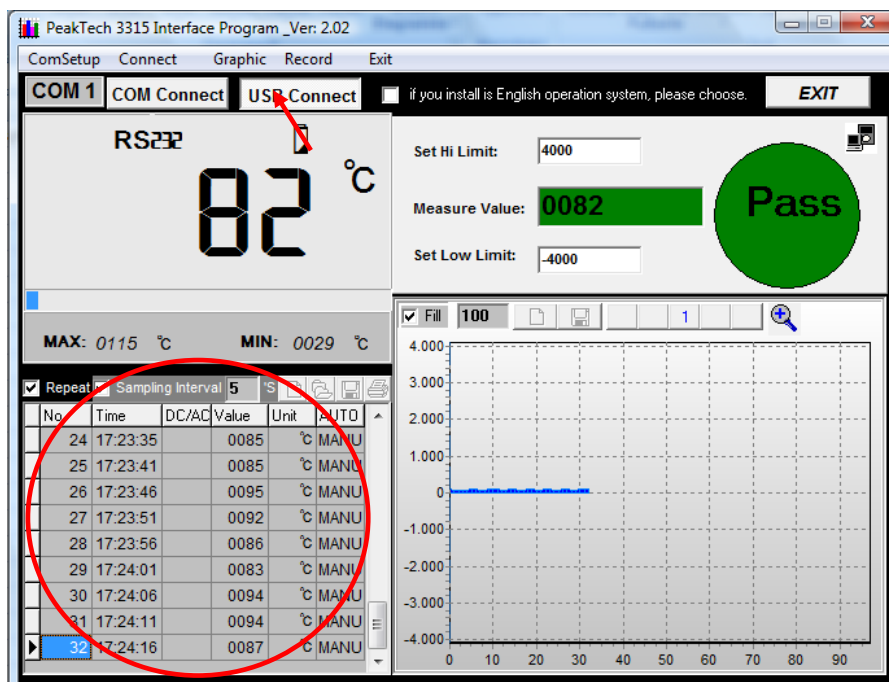
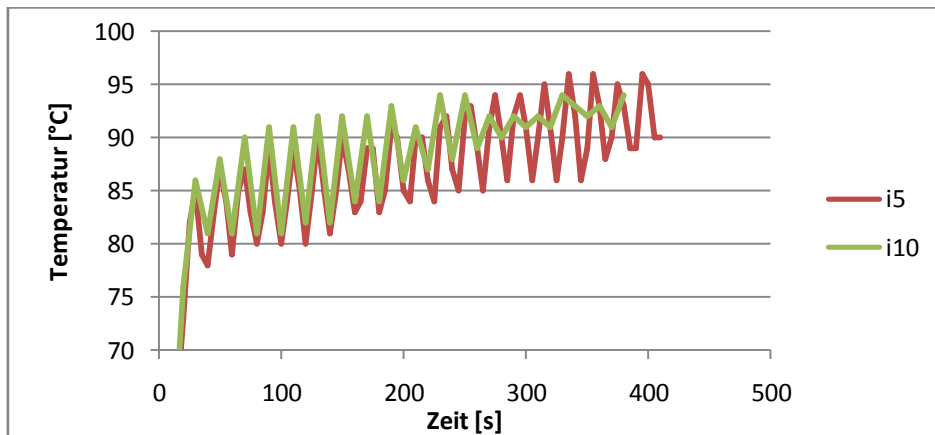


Abbildung 3.9: Peak Tech 3315 Interface Program: Die Temperaturwerte wurden angezeigt und im eingestellten Intervall in einer Tabelle aufgenommen.

## Intervall der Aufnahme

Im nicht regelbaren Heißluftgerät wurde alle 30 Sekunden ein Messwert festgehalten. Bei den Messungen im Heißluftgerät mit Temperaturregelung wurden für eine genaue Wiedergabe feinere Intervalle gewählt. Um das Zeitverhalten des Zweipunktreglers in den Messwerten zu erkennen, musste die Software zwischen Anstiegs- und Abfallzeitraum des Regelkreises mehrere Temperaturwerte aufnehmen. Läge z. B. der Zeitpunkt der Aufnahme stets im Augenblick des maximalen Temperaturwerts, so würden die Messwerte statt einer Schwingung ein lineares Signal wiedergeben.

Es wurde festgestellt, dass die Messwerte bei einem Intervall von zehn Sekunden das Schwingverhalten nicht mehr richtig darstellen (s. Abbildung 3.10). Die Temperatur steigt im Durchschnitt zehn Sekunden an, um dann für zehn Sekunden abzufallen. Somit beträgt die Schwingungsdauer etwa 20 Sekunden. Für die Messungen wurde erst ein Intervall von fünf Sekunden, später eine Messaufnahme pro Sekunde eingestellt.



**Abbildung 3.10: Intervallvergleich:** Derselbe Messpunkt hat mit unterschiedlich eingestellten Aufnahmezeiten einen verschiedenartigen Kurvenverlauf. Ein Intervall von zehn Sekunden (grüne Linie) gibt nach etwa 200 s einen ungenauen Temperaturverlauf wieder.

### 3.1.3 Versuchsablauf

Vor Beginn jeder Messung wurde stets die Raumtemperatur gemessen und notiert. Sie betrug im arithmetischen Mittel  $20,1\text{ °C} \pm 0,9\text{ °C}$ . Während der Messungen im Labor gab es keine Luftströme, die zu veränderten Messergebnissen geführt hätten.

#### Heißluftgerät ohne Temperaturregelung

Es wurden Temperaturen an sechs verschiedenen Messpunkten im offenen Erwärmungstopf gemessen. Die Ausgangstemperatur wurde vor dem Anschalten des Geräts bestimmt. Die zum Zeitpunkt  $t = 0\text{ s}$  gemessene Temperatur betrug für jeden Messpunkt  $22\text{ °C} \pm 2\text{ °C}$ . Das Heißluftgerät wurde angeschaltet, zeitgleich eine Stoppuhr gestartet und alle 30 Sekunden ein Temperaturwert notiert. Nach 240 Sekunden Betriebszeit wurde das Heißluftgerät ausgeschaltet. War das Gerät auf  $22\text{ °C} \pm 2\text{ °C}$  abgekühlt, erfolgte die nächste Messung. Der Abkühlvorgang dauerte etwa 30 Minuten. Weiter wurde das Verhalten des Geräts bei zehn minütiger Betriebszeit ermittelt. Für die Messungen bei geschlossenem Deckel, wurde der Temperaturfühler seitlich in den Erwärmungstopf geführt, da zum Zeitpunkt des Versuchs der präparierte Deckel noch nicht zur Verfügung stand. Um die Temperatur vergleichen zu können, wurde der Messpunkt im Zentrum verwendet und TC11 genannt. Dieser lag mit einem Abstand von 35 mm zur Siebabdeckung 5 mm höher als Messpunkt T211. Auch diese Messung wurde durchgeführt, indem der Temperaturwert zum Zeitpunkt  $t = 0\text{ s}$  notiert, das Gerät eingeschaltet und im Intervall von 30 Sekunden ein Wert abgelesen und aufgeschrieben wurde. Um die Ebenen miteinander vergleichen zu können, wurde der Mittelwert aus den Temperaturdifferenzen gebildet. Die ersten 60 Sekunden sind nicht im Mittelwert enthalten.

#### Heißluftgerät mit Temperaturregelung

Zunächst wurden die Temperaturen bei einer festen Temperatureinstellung von  $120\text{ °C}$  erst im offenen, dann im geschlossenen Topf gemessen. Im Anschluss erfolgte eine Messung im offenen Topf mit der neuen, selbst konstruierten Siebabdeckung. Zuletzt wurde bei vorgegebenen Messpunkten die Temperatureinstellung variiert. Hierbei war der Erwärmungstopf geschlossen. Mit gewöhnlicher Siebabdeckung wurden Datenreihen bei voreingestellten  $75\text{ °C}$ ,  $100\text{ °C}$ ,  $140\text{ °C}$  und  $180\text{ °C}$  aufgenommen.

#### 120°C-Einstellung und offener Topf

Für die Datenaufnahme in Ebene 2 wurde im *P3315 Interface Program* ein Intervall von 15 Sekunden eingestellt. Für die Messung von Ebene 1 und 3 wurde das Intervall der Datenaufnahme auf fünf Sekunden verkürzt und für jeden Messpunkt 25 Messwerte aufgenommen. Die Daten gaben durch das kleine Zeitintervall den Temperaturverlauf genauer wieder und lieferten etwa die gleiche Anzahl von Messwerten wie die vorherige Methode:

*Aufnahmezeit von 375 s im Intervall von 15 s ergab 26 Messwerte (Ebene 2)*

*Aufnahmezeit von 120 s im Intervall von 5 s ergab 25 Messwerte (Ebene 1, 3)*

Der Messvorgang ähnelte der Gerätenutzung im augenoptischen Betrieb. Das Gerät war zwei Minuten eingeschaltet, etwa drei Minuten ausgeschaltet, wieder zwei Minuten eingeschaltet, etc. Damit der erste Messwert die Temperatur zum Zeitpunkt  $t = 0 \text{ s}$  wiedergab, wurde zunächst die Verbindung zum Messgerät hergestellt. Das Programm nahm den ersten Messwert auf. Dann wurde das Heißluftgerät eingeschaltet. War der 25. Messwert der Messreihe aufgenommen, wurde das Gerät abgeschaltet. Nach etwa drei Minuten herrschte im Erwärmungstopf eine Temperatur von  $45 \text{ °C} \pm 5 \text{ °C}$ . Die Verbindung wurde gestoppt und die Werte gespeichert. Die Daten in der Software wurden gelöscht, ein neuer Messpunkt eingestellt, die Verbindung zum Multimeter hergestellt und das Heißluftgerät erneut eingeschaltet. Der Messprozess fand so lange statt, bis in jeder Ebene alle 21 Messpunkte aufgenommen waren. Darüber hinaus wurde geschaut, welche Messpunkte über den Öffnungen in der Siebabdeckung lagen, um die Auswertung später darauf beziehen zu können. Für Messungen mit der selbst hergestellten Siebabdeckung wurde im *P3315 Interface Program* ein Aufnahmeintervall von fünf Sekunden eingestellt. Die Messpunkte wurden unter gleichen Bedingungen wiederholt gemessen, um die Messergebnisse einander angleichen zu können. Die Reihenfolge, in der die Messpunkte vermessen wurden, erfolgte zufällig. Die Messpunkte, die zu hohen Temperaturen neigten, wurden mit längerer Aufnahmezeit vermessen als die, deren Temperaturwerte sich kaum änderten.

#### 120 °C-Einstellung und geschlossener Topf

Für die Temperaturmessungen im geschlossenen Erwärmungstopf kam der präparierte Deckel zum Einsatz. Es wurden Temperaturen an neun Messpunkten gemessen. Damit während der Messung keines der Löcher im Deckel offen blieb, wurden diese durch sechs bis sieben kurze Schrauben abgedichtet. Für die Datenaufnahme wurde im *P3315 Interface Program* ein Intervall von einer Sekunde eingestellt. Als Ausgangssituation wurde im Erwärmungstopf eine Temperatur von  $45 \text{ °C} \pm 5 \text{ °C}$  festgelegt. Diese spiegelte zwar nicht den gewöhnlichen Gebrauch des Geräts wider, vielmehr sollte untersucht werden, wie reproduzierbar die Werte sind. Die Temperatur an jedem Messpunkt wurde zweimal gemessen. Der Ablauf der Datenaufnahme und Speicherung erfolgte wie bei den Messungen im offenen Topf.

#### 75 °C-, 100 °C-, 140 °C- und 180 °C-Einstellung (geschlossener Topf)

Der Temperaturfühler wurde im geschlossenen Topf am Messpunkt T202 positioniert und die ermittelte Temperatur T202c genannt. Während der Messpunkt unverändert blieb, wurde der Drehknopf am Heißluftgerät zunächst auf  $75 \text{ °C}$  eingestellt. Wie bei den vorherigen Messungen wurde die Verbindung zwischen Multimeter und Computer hergestellt. Sobald der erste Messwert aufgenommen war, wurde das Heißluftgerät eingeschaltet und nach einem Zeitraum von 150 Sekunden ausgeschaltet. Die Verbindung wurde deaktiviert, sodass die Daten gespeichert werden konnten. Es folgten Messungen bei vorgewählten  $100 \text{ °C}$ ,  $140 \text{ °C}$  und  $180 \text{ °C}$ . Jede Datenaufnahme erfolgte in einem Intervall von einer Sekunde. Ausgangstemperatur war  $45 \text{ °C} \pm 5 \text{ °C}$ . In gleicher Weise wurde die Temperatur an einem zweiten Messpunkt (T210c) gemessen.

### 3.1.4 Datenanalyse

Für die Auswertung wurden die gespeicherten Daten in eine neue *Excel-Datei* importiert. Die Ermittlung folgender statistischer Größen erfolgte für jede Messreihe mithilfe von *Excel*: Anzahl der Messwerte, Spanne, arithmetischer Mittelwert und Standardabweichung. Der sprunghafte Temperaturanstieg in den ersten Sekunden (Erwärmungsphase des Geräts) ist in diesen Größen nicht enthalten. Die Spanne wurde aus der Differenz zwischen Maximal- und Minimalwert errechnet. Es wurden Spannweitendiagramme verwendet, um die Mittelwerte und die Grenzwerte der Temperaturen in Abhängigkeit vom Messpunkt abzubilden. Grundsätzlich ist diese Auswertung empfindlich gegenüber Ausreißern. Trotzdem dienen die Spannweiten der schnellen Erkenntnis, welche Messpunkte konstant sind und ob sich die Mittelwerte deutlich voneinander unterscheiden. In xy-Diagrammen wurde das Zeitverhalten der Temperatur für jeden Messpunkt betrachtet. Die digital aufgenommenen Daten verkörpern für eine bestimmte Zeit einen festen Wert. Deshalb wurden für die Darstellung eines kontinuierlich-analogen Messsignals die Messwerte mit Excel interpoliert. Aus diesem Diagrammtyp ist der schnelle Temperaturanstieg der ersten Sekunden ersichtlich. Die Anstiegs- und Abfallzeiten der Temperatur repräsentieren den Wirkungsablauf des Zweipunktreglers mit An- und Ausregelzeit. Nachteilig ist, dass aus Gründen der Übersichtlichkeit nicht alle 21 Messpunkte in einem Diagramm verglichen werden können. Das in den Grundlagen erklärte zweidimensionale Temperaturfeld konnte mit dem in Excel vorgegebenen Oberflächendiagramm erstellt werden. Es veranschaulicht die Temperaturdifferenzen durch unterschiedliche Farbgebungen. Da die rechteckige Fläche durch ein Gitter aus x- und y-Koordinaten beschrieben wird, musste für die Erstellung des Diagramms jedem Koordinatenpunkt eine Temperatur zugeordnet werden können. Mit den gitterförmig angeordneten 21 Messpunkten war dies möglich, jedoch ergaben sie eine Kreisfläche. Deshalb wurde an vier Koordinatenpunkten, wo kein Messwert vorlag, ein Mittelwert aus den angrenzenden Temperaturwerten gebildet. Für die Erstellung eines Temperaturfeldes für das geschlossene Heißluftgerät lagen zu wenige Messpunkte vor.

## 3.2 Widerstandsmessungen der Temperatursensoren

Bei dem Temperatursensor im Heißluftgerät mit Temperaturregelung handelt es sich um einen Widerstand. Mit den Widerstandsmessungen sollte die Streuung dieser im Heißluftgerät verwendeten Temperaturwiderstände ermittelt werden. 19 identische, von der Firma *Deyle GmbH* bereitgestellte, Widerstände wurden isoliert getestet. Für jeden Widerstand wurden Warm- und Kaltwerte gemessen. Die Messung der Warmwerte erfolgte bei 100 °C in einem Wärmeschrank. Die Bezeichnung „Kaltwert“ bekam der Widerstandswert, der bei Raumtemperatur gemessen wurde.

### 3.2.1 Versuchsaufbau und Datenaufnahme

#### Warmwert-Messung

Die Abbildung 3.11 zeigt den Versuchsaufbau der Widerstandsmessung. Es wurde dasselbe Multimeter verwendet wie zur Temperaturmessung (*PeakTech3315 USB*). Die Position des Funktionswahlschalters am Multimeter wurde für die Widerstandsmessung entsprechend geändert, sodass die Messwerte in der Einheit Ohm ( $\Omega$ ) angezeigt wurden.

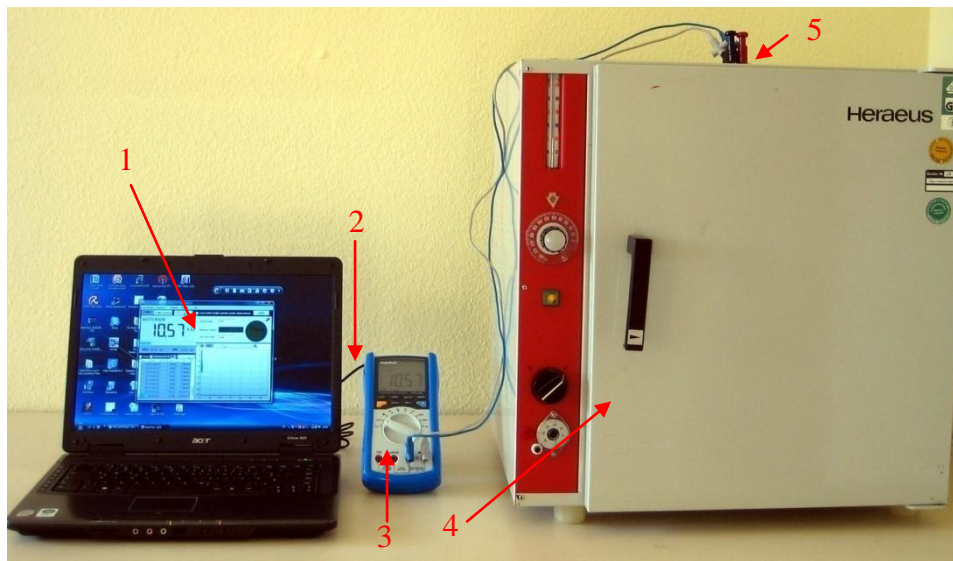


Abbildung 3.11: Messaufbau der Widerstandsmessungen bei 100 °C

- |  |                             |
|--|-----------------------------|
| (1) Computer mit P3315 Interface Program | (2) USB-Schnittstellenkabel |
| (3) Multimeter                           | (4) Wärmeschrank            |
| (5) Prüfling mit Widerstand              |                             |

Die Genauigkeit für Widerstandsmessungen betrug im Messbereich von 4 k $\Omega$  bis 400 k $\Omega \pm 1\% + 2$  St. (Bedienungsanleitung des Multimeters). Das USB-Schnittstellenkabel sorgte für die Verbindung zum PC. Es wurde die Software *P3315 Interface Program* benutzt (s. Kapitel 3.1.2). Bei aktivierter Verbindung erfolgte die Datenaufnahme automatisch. Der Widerstand, der an die Prüfling des Multimeters angelegt war, befand

sich während der Messung in einem Wärmeschrank. Benötigt wurde der Wärmeschrank, um eine konstante Temperatur von 100 °C zu erzeugen. Er verfügte über eine Temperaturanzeige durch ein Flüssigkeitsthermometer und einen schmalen verschließbaren Durchlass an der Schrankdecke, durch den die Prüflitung mit dem Widerstand ins Schrankinnere gebracht wurde (s. Abbildung 3.12). Da die Türe während dem gesamten Messvorgang geschlossen blieb, konnte nur durch den schmalen Spalt an der Decke für einen kurzen Moment Wärme entweichen. Der für die Temperaturmessungen eingesetzte Temperaturfühler war an ein zweites Multimeter, ebenfalls ein *Peak-Tech3315 USB*, angeschlossen. Es konnte eine Temperaturmessung in unmittelbarer Nähe des Widerstands durchgeführt werden, indem der Temperaturfühler ebenfalls durch den Deckeneinlass ins Schrankinnere gehalten wurde.



Abbildung 3.12: Widerstand im Wärmeschrank

### Kaltwert-Messung

Um bei der zweiten Widerstandsmessung den Kaltwert der Widerstände zu ermitteln, wurden folgende bereits erwähnte Messmittel benutzt: PC und Software, Multimeter mit Prüflitung und Anschlusskabel für die Widerstandswerte aufzunehmen und ein zweites Multimeter mit Temperaturfühler, um die am Widerstand herrschende Temperatur zu messen. Es wurden mithilfe des Multimeters die 19 Temperaturwiderstände bei Raumtemperatur gemessen. Diese betrug am Tag der Messung 24 °C. Die Datenaufnahme erfolgte automatisch.



### 3.2.2 Versuchsablauf

#### Warmwert-Messung

Die am Wärmeschrank durch einen Drehknopf eingestellte Temperatur von 100 °C wurde nach etwa 30 Minuten erreicht. Der Durchlass in der Schrankdecke wurde geöffnet, der Temperaturfühler und die Prüflleitung mit dem ersten Widerstand wurden angebracht und die Öffnung anschließend zugeschoben. Im *Interface Program* wurde ein Intervall von 60 Sekunden eingestellt und anschließend die Verbindung zum Multimeter hergestellt, sodass die Widerstandswerte übermittelt werden konnten. Nach etwa zehn Minuten stabilisierte sich der Wert und die Messung wurde beendet. Die Speicherung der Messwerte erfolgte nach der Deaktivierung der Verbindung zum Multimeter und vor der Entnahme des Widerstands aus dem Wärmeschrank. Ein neuer Widerstand wurde an die Prüflleitung angelegt und in den Wärmeschrank gebracht. Um den Widerstand beschriften zu können und Fehler zu vermeiden, kam der getestete Widerstand in einen nummerierten Briefumschlag. Der Ablauf wiederholte sich, bis alle 19 Widerstände gemessen waren. Der Temperaturfühler befand sich bei sieben Widerstandsmessungen im Wärmeschrank.

#### Kaltwert-Messung

Die Verbindung zwischen *P3315 Interface Program* und Multimeter war fortlaufend aktiviert. Die Widerstände wurden der Reihe nach aus den Briefumschlägen genommen und an die Prüflleitung angeschlossen. In einem Intervall von fünf Sekunden wurden jeweils zehn Messwerte aufgenommen. Der Temperaturfühler befand sich in unmittelbarer Nähe zum Widerstand. Nach der letzten Widerstandsmessung (W19) wurde die Verbindung zum Multimeter deaktiviert und die Daten als *Excel-Datei* gespeichert.

### 3.2.3 Datenanalyse

Für die Auswertung der Warmwerte wurden die Anzahl der Messwerte, der arithmetische Mittelwert, die Standardabweichung und die Spanne berechnet (*Excel*). Dazu wurden die Messwerte, die den stabilen Warmwert repräsentierten, in eine neue *Excel-Datei* übertragen. Im Anschluss wurden die Werte durch Bildung des Mittelwerts angeglichen. Für die Warmwerte der Widerstände W01, W13, W14, W15, W16, W17, W18, W19 flossen mindestens fünf Messwerte in die statistische Auswertung. Für die anderen elf Widerstände lagen weniger Messwerte vor. Für die Auswertung der Kaltwerte betrug die Anzahl der Messwerte im Durchschnitt etwa  $n = 9$ . Die Beurteilung der Streuung der Widerstände erfolgte ebenfalls mithilfe des arithmetischen Mittelwerts  $\bar{x}$  und der Standardabweichung  $s$ . Diese wurden aus den 19 gemittelten Widerstandswerten jeweils für den warmen und kalten Zustand berechnet.

### 3.3 Strömungsverhalten im Heißluftgerät

Um die Luftströme, die sich im Erwärmungstopf je nach verwendeter Siebabdeckung entwickeln, sichtbar zu machen, kam eine Nebelmaschine zum Einsatz, die künstlichen Nebel durch verdampftes Nebelfluid erzeugte.

#### 3.3.1 Versuchsaufbau und -ablauf

Für den Versuchsaufbau wurden ein Heißluftgerät, eine Nebelmaschine (s. Tabelle 3.5) und ein Karton benutzt. Die Nebelmaschine stieß das eingefüllte Fluid als Nebel ausschließlich in den dicht verschlossenen Karton, über welchen das Heißluftgerät die Luft einsog. Das für die Nebelmaschine notwendige Loch wurde seitlich in die Kartonwand geschnitten. Eine in den Kartondeckel geschnittene Öffnung mit den Maßen des Heißluftgerätebodens sorgte für den Luftzugang zum Heißluftgerät. Mithilfe von Klebeband wurde das Heißluftgerät über diese befestigt, ohne dabei die Luftzufuhr am Boden des Geräts zu blockieren. Es handelte sich um das Passat-Gerät mit Temperaturregelung, welches zuvor für die Temperaturmessungen verwendet wurde.

**Tabelle 3.5: Technische Daten der Nebelmaschine *Mini Fog* von *American DJ***

Ausstoß	150 m <sup>3</sup> /min
Fluid	Water Base American DJ Fog Juice <sup>TM</sup>

Die Nebelmaschine wurde mit Nebelflüssigkeit aufgefüllt und eingeschaltet. Ausgelöst wurde der Ausstoß des Nebels per Handsteuerung. Das Heißluftgerät wurde ebenfalls eingeschaltet. Aufgrund der Verdunstung des Nebels bei zu starker Hitze an der Heizspirale wurde das Heißluftgerät auf die kleinste Temperaturstufe eingestellt, um einen ausreichend sichtbaren Luftstrom zu erhalten. Da der Deckel sofort beschlug, wenn er geschlossen wurde, kamen nur Betrachtungen mit offenem Deckel zustande.

## 4 Ergebnisse

### 4.1 Temperaturmessungen im Heißluftgerät

Unter anderem wurde festgestellt, dass die Geräte im ausgeschalteten Zustand Strom leiten.

#### Heißluftgerät ohne Temperaturregelung (HLG 1)

Die Messpunkte zeigen ein gleichartiges Temperaturverhalten. In den ersten 30 Sekunden steigt die Temperatur schlagartig an. Nach 90 Sekunden ist die Erwärmungszunahme nahezu konstant. Beschreibt man den Temperaturverlauf ab diesem Zeitpunkt mithilfe einer Funktion, so unterscheiden sich die Steigungen der einzelnen Funktionen kaum voneinander, aber wohl die Temperaturen der Messpunkte. Aus Abbildung 4.1 ist ersichtlich, dass der Messpunkt T311 zu jedem Zeitpunkt die niedrigste Temperatur besitzt. T211 ist im Mittel 8,17 °C wärmer als T311, T206 ist 8 °C wärmer als T306 und zwischen T202 und T302 liegt 14,83 °C Temperaturunterschied. Die Graphik verdeutlicht, dass die Temperaturlinien parallel verschoben sind. Die Temperaturen von Messpunkt T306 und T211 sind nahezu deckungsgleich. Ihre Temperaturdifferenz beträgt im Mittel nur 0,33 °C.

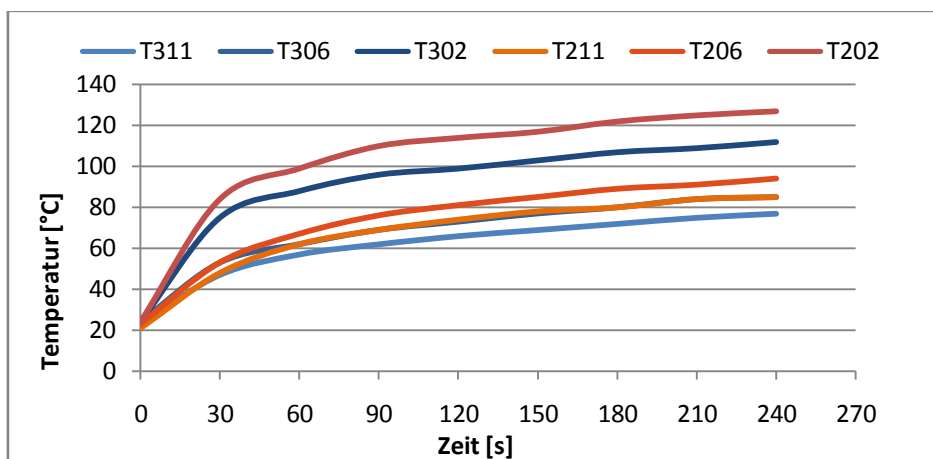


Abbildung 4.1: Vergleich von jeweils drei Messpunkten in Ebene 2 und 3 im offenen HLG 1

Betrachtet man nur eine Ebene, so ist die Temperaturverteilung dort ungleichmäßig. Bspw. hat der am Rand gelegene Messpunkt T202 zum Zeitpunkt  $t = 180$  s eine um 40 °C höhere Temperatur als der zentrale Messpunkt T211. Die Temperatur im Erwärmungstopf ist von den Öffnungen in der Siebabdeckung abhängig. Vergleicht man die Temperatur am äußeren Messpunkt T302 mit T202, so hat T302 nach 120 Sekunden einen Temperaturwert von 100 °C. In Ebene 2 ist dieser Wert bereits nach 60 Sekunden

erreicht. Hingegen wird an den zentralen Messpunkten dieser Wert auch nach 240 Sekunden nicht erreicht.

Bleibt das offene Heißluftgerät länger als fünf Minuten eingeschaltet, ergibt sich der in Abbildung 4.2 erkennbare Temperaturverlauf. Die Temperatur steigt stetig. Ab einer Gerätelauzeit von 300 Sekunden erhöht sich die Temperatur alle 30 Sekunden um ca. 1 °C. Der Temperaturverlauf lässt sich einer Geraden annähern. Nach 540 Sekunden beträgt die Temperatur 115 °C am vorgegebenen Punkt T106.

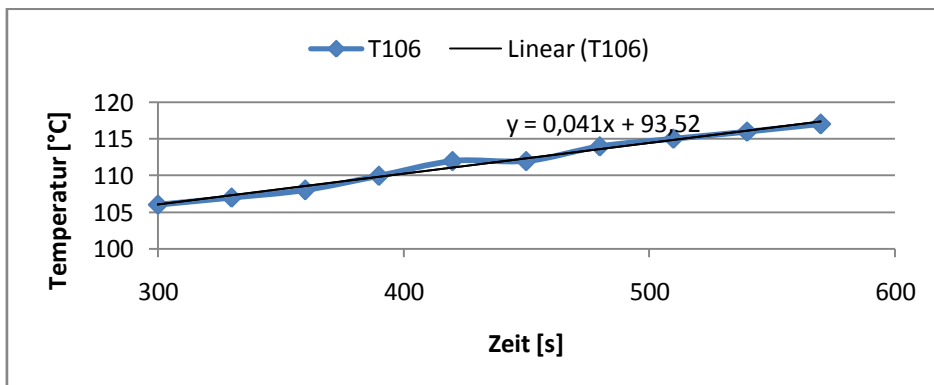


Abbildung 4.2: Zeitlicher Temperaturverlauf von T106 im offenen HLG 1

Im geschlossenen Heißluftgerät steigt die Temperatur sehr schnell an. Die Abbildung 4.3 veranschaulicht die hohe Temperaturdifferenz des zentralen Messpunkts zwischen geschlossenem und offenem Gerät. Der Temperaturwert von TC11, der bei geschlossenem Deckel ermittelt wurde, ist zu jedem Zeitpunkt eindeutig höher als der von T211/T311. Eine Temperatur von 100 °C, bei der viele Kunststoffe formbar werden, wird bereits nach 40 Sekunden erreicht. Nach 60 Sekunden ist die Temperatur im geschlossenen Topf um 55 °C höher als im offenen Topf. Nach 150 Sekunden sind über 70 °C Temperaturunterschied erreicht. Zu diesem Zeitpunkt erlangt Messpunkt TC11 eine Temperatur von 150 °C.

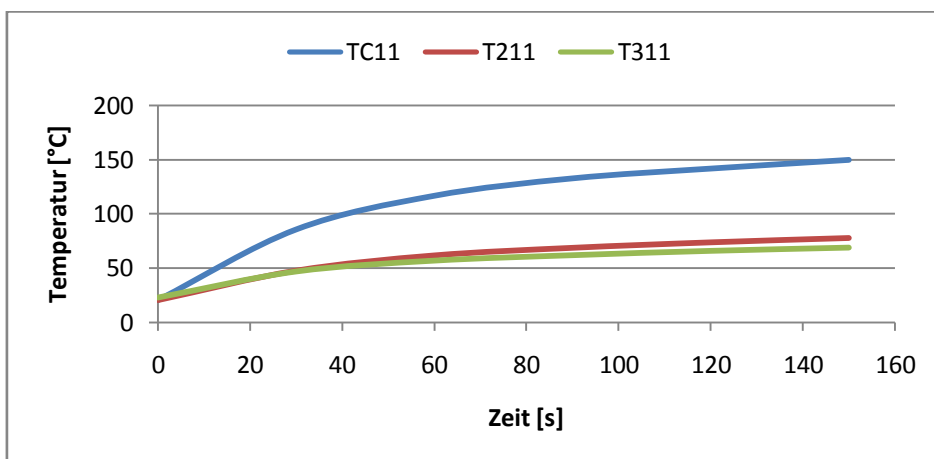


Abbildung 4.3: Vergleich des Temperaturverlaufs von offenem und geschlossenem HLG 1: Bei TC11 handelt es sich um den Messpunkt 11, der bei geschlossenem HLG 1 gemessen wurde.

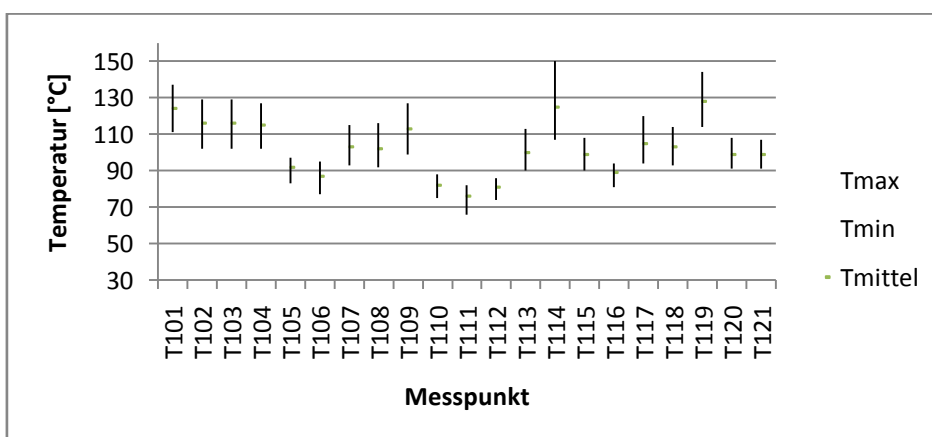
Aus der entstehenden starken Hitze folgt, dass bei geschlossenem Deckel nach längerem Erwärmen der Kunststoff überhitzt. Es lässt sich kein genauer Zeitpunkt definieren, da peripher höhere Temperaturen gemessen wurden als zentral. Die Höhe des Temperaturwerts hängt vom Messpunkt ab. Grundsätzlich erreicht man mit dem geschlossenen Aufsatz eine schnelle Erwärmung.

### Heißluftgerät mit Temperaturregelung (HLG 2)

In den ersten 20 Sekunden steigt die Temperatur in allen Messpunkten bis zu einem Maximalwert sprunghaft an. Dann schwankt die Temperatur um einen mittleren Wert.

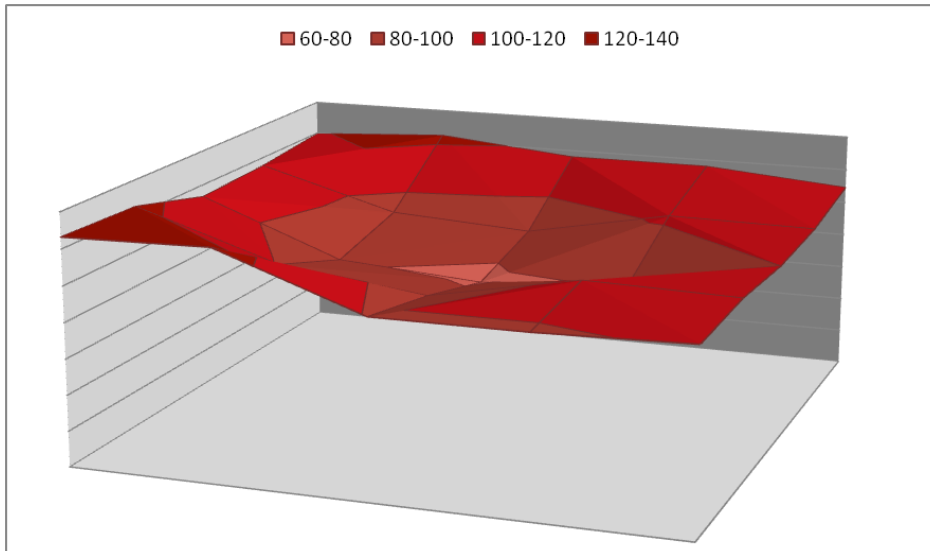
#### 120°C-Einstellung und offener Topf

Die Messpunkte haben unterschiedliche Mittelwerte und verschieden große Schwankungsbreiten. In Ebene 1 (s. Abbildung 4.4) sind die Temperaturunterschiede am größten. Die Messpunkte T101, T114 und T119 zeigen die höchsten Temperaturmittelwerte auf. Sie befinden sich am linken Rand des Erwärmungstopfes. Im Zentrum am Messpunkt T111 ist die Temperatur am niedrigsten. Zwischen dem größten (128 °C) und dem kleinsten Mittelwert (76 °C) liegt eine Differenz von 52 °C. In anderen Worten: Zwischen der rechten Peripherie und der Mitte des Topfs liegt ein Temperaturunterschied von über 50°C vor. Von der Mitte zur linken Peripherie ist der Unterschied nur halb so groß. T114 erreicht die höchste Temperatur (150 °C) und die größte Temperaturspanne (43 °C). D. h. die Temperatur im Messpunkt T114 ist mit  $125\text{ °C} \pm 20\text{ °C}$  sehr ungenau. Die kleinsten Spannweiten weisen T105, T110, T111, T112 und T116 auf. Sie befinden sich in der Mitte des Topfs und besitzen Temperaturwerte, die sehr viel niedriger sind als 120 °C. Die kleinste Temperaturspanne hat Messpunkt T112 mit  $81\text{ °C} \pm 6\text{ °C}$ . Durchschnittlich lässt sich statt der vorgewählten Temperatur von 120 °C ein Wert von 102 °C mit einer Standardabweichung von  $s = 15\text{ °C}$  ermitteln.



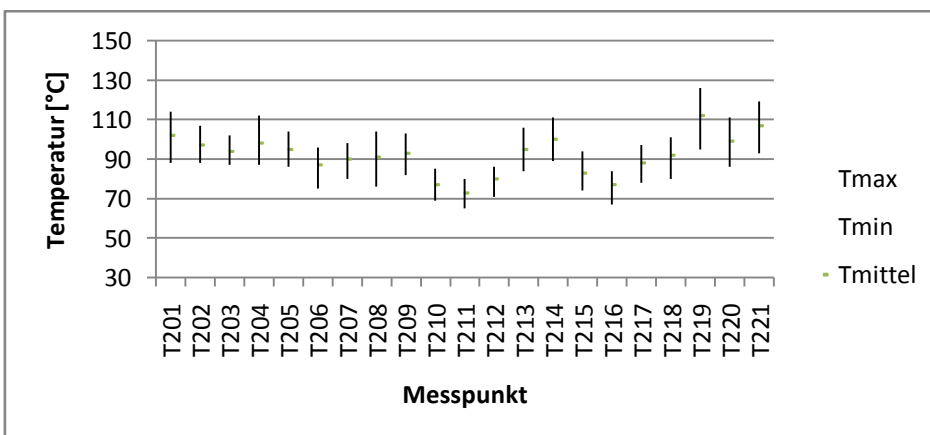
**Abbildung 4.4: Spannweitendiagramm der Temperaturwerte in Ebene 1 (offenes HLG 2):** Das Diagramm zeigt die Temperatur in Abhängigkeit vom Ort in einem Zeitraum von 95 Sekunden. Für jeden Messpunkt wurde eine Messreihe aus 20 Messwerten mit Excel ausgewertet. Die ersten 25 Sekunden und somit die ersten fünf Messwerte sind nicht enthalten.

Die Abbildung 4.5 zeigt die Temperaturverteilung in Ebene 1 als dreidimensionale Darstellung. Die Temperatur ist zentral im Erwärmungstopf am geringsten (60 °C - 80 °C). Nach außen steigt die Temperatur an. In der mittleren Peripherie ist die Temperatur um 20 °C und in der Peripherie um weitere 20 °C höher. Die höchsten Werte (120 °C – 140 °C) befinden sich an den linken Rändern des Topfs.



**Abbildung 4.5: Dreidimensionale Darstellung der Temperaturverteilung in Ebene 1 (offenes HLG 2):** Es war eine Temperatur von 120 °C eingestellt.

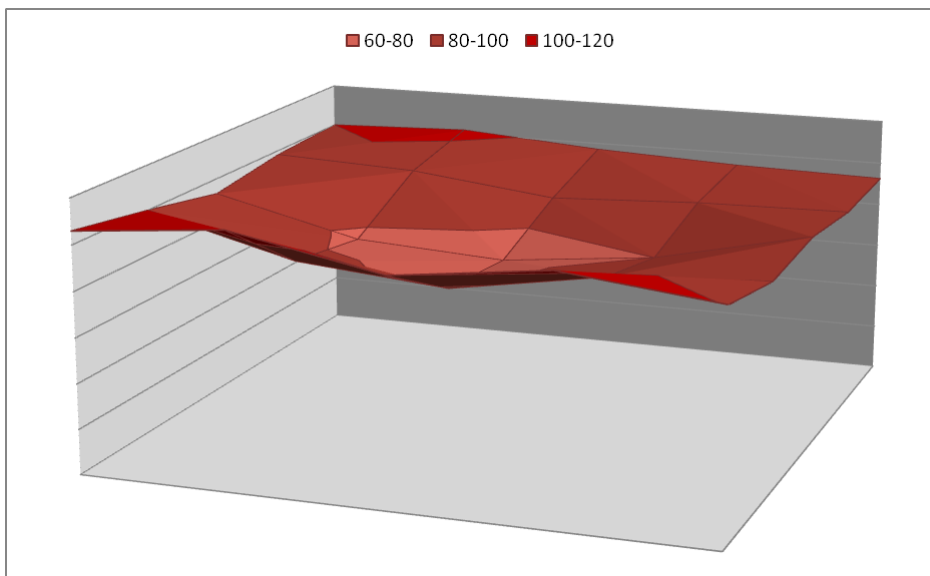
In Ebene 2 (s. Abbildung 4.6) weisen die Messpunkte T214, T219 und T221 die höchsten Mittelwerte auf. Sie liegen in der vorderen Peripherie. Z. B. beträgt die Temperatur am Messpunkt T221  $107\text{ °C} \pm 13\text{ °C}$ . Die niedrigsten Mittelwerte liegen auch hier zentral im Topf (T210, T211 und T212), dort wo die Siebabdeckung keine Öffnungen besitzt. Der Messpunkt T210 hat einen Mittelwert von  $77\text{ °C} \pm 8\text{ °C}$ . Es entsteht zwischen dem kleinsten (73 °C) und dem größten Mittelwert (112 °C) eine Differenz von 39 °C.



**Abbildung 4.6: Spannweitendiagramm der Temperaturwerte in Ebene 2 (offenes HLG 2):** Das Diagramm zeigt die Temperatur in Abhängigkeit vom Ort in einem Zeitraum von 345 Sekunden. Für jeden Messpunkt wurde eine Messreihe aus 24 Messwerten mit Excel ausgewertet. Die ersten 30 Sekunden und somit die ersten zwei Messwerte sind nicht enthalten.

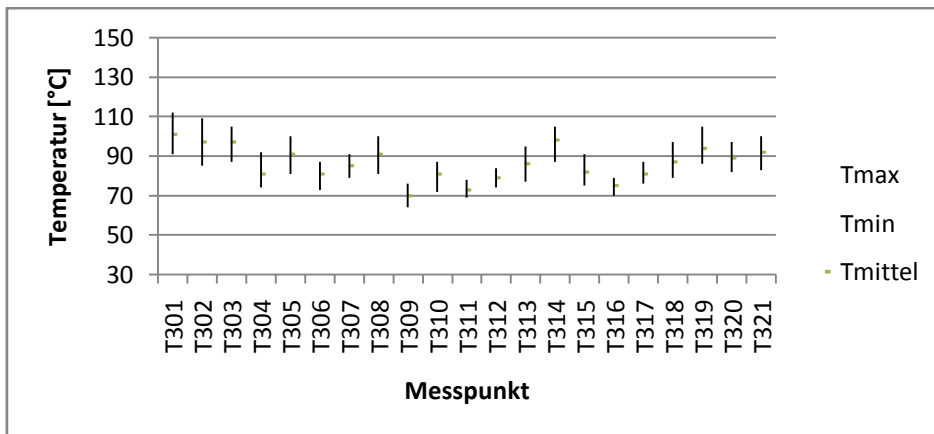
Alle Mittelwerte der Messpunkte liegen unter dem eingestellten Temperaturwert von 120 °C. Mit einer Spanne von 31 °C ( $\pm 15,5$  °C) schwankt die Temperatur am Messpunkt T219 am stärksten. Mit ungefähr  $\pm 7,5$  °C haben die zentralen Messpunkte die kleinsten Spannweiten. In Ebene 2 beträgt die Durchschnittstemperatur 92 °C mit einer Standardabweichung von  $s = 10$  °C. Sie ist damit 10 °C kälter als in Ebene 1.

Die Abbildung 4.7 zeigt die Temperaturverteilung in Ebene 2 als dreidimensionale Darstellung. Zentral im Erwärmungstopf ist die Temperatur am geringsten (60 °C - 80 °C). Zur Peripherie steigt die Temperatur um 20 °C an, wobei sich die höchsten Werte (100 °C - 120 °C) unmittelbar am Rand des Topfs befinden.



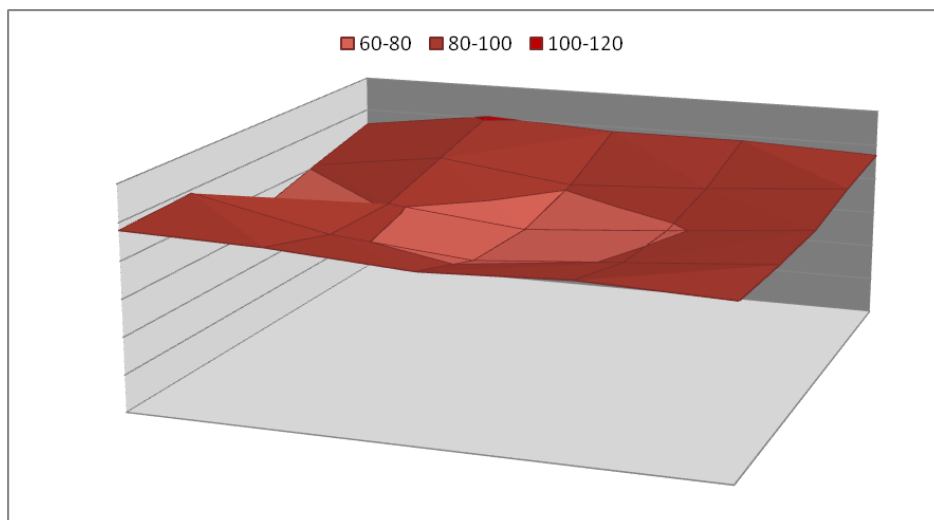
**Abbildung 4.7: Dreidimensionale Darstellung der Temperaturverteilung in Ebene 2 (offenes HLG 2):** Es war eine Temperatur von 120 °C eingestellt.

In Ebene 3 (s. Abbildung 4.8) weisen die Messpunkte T301 und T314 die höchsten Mittelwerte auf. Z. B. beträgt die Temperatur am Messpunkt T301  $101$  °C  $\pm 10$  °C. Die niedrigsten Mittelwerte liegen zentral im Topf (T311 und T316) und in der linken Peripherie (T309), wo sich eine seitliche Öffnung im Erwärmungstopf befindet. Der Messpunkt T311 hat einen Mittelwert von  $73$  °C  $\pm 4,5$  °C. Es entsteht zwischen dem kleinsten ( $73$  °C) und dem größten Mittelwert ( $101$  °C) eine Differenz von  $28$  °C. Mit einer Spanne von  $24$  °C ( $\pm 12$  °C) schwankt die Temperatur am Messpunkt T302 am stärksten. Mit ungefähr  $\pm 4,5$  °C haben die zentralen Messpunkte die kleinsten Spannweiten. Alle Mittelwerte der Messpunkte liegen weit unter dem vorgewählten Temperaturwert von 120 °C. Die Durchschnittstemperatur der Messwerte von Ebene 3 beträgt  $86$  °C. Damit ist Ebene 3 im Mittel  $6$  °C kälter als Ebene 2 und  $16$  °C kälter als Ebene 1. Die Temperaturen der Messpunkte unterscheiden sich mit einer Standardabweichung von  $s = 9$  °C voneinander.



**Abbildung 4.8: Spannweitendiagramm der Temperaturwerte in Ebene 3 (offenes HLG 2):** Das Diagramm zeigt die Temperatur in Abhängigkeit vom Ort in einem Zeitraum von 95 Sekunden. Für jeden Messpunkt wurde eine Messreihe aus 20 Messwerten mit Excel ausgewertet. Die ersten 25 Sekunden sind nicht enthalten.

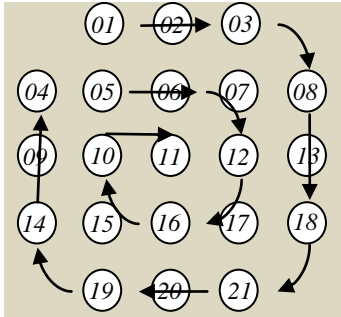
Die Abbildung 4.9 zeigt die Temperaturverteilung in Ebene 3 als dreidimensionale Darstellung. In der Mitte des Erwärmungstopfs und in der linken Peripherie, wo im Erwärmungstopf die linke Öffnung liegt, ist die Temperatur am geringsten (60 °C - 80 °C). Zur Peripherie steigt die Temperatur um 20 °C an. Zur rechten Peripherie zeigt sich zentral, wo sich die rechte Öffnung des Erwärmungstopfs befindet, kein Temperaturabfall.



**Abbildung 4.9: Dreidimensionale Darstellung der Temperaturverteilung in Ebene 3 (offenes HLG 2):** Es war eine Temperatur von 120 °C eingestellt.

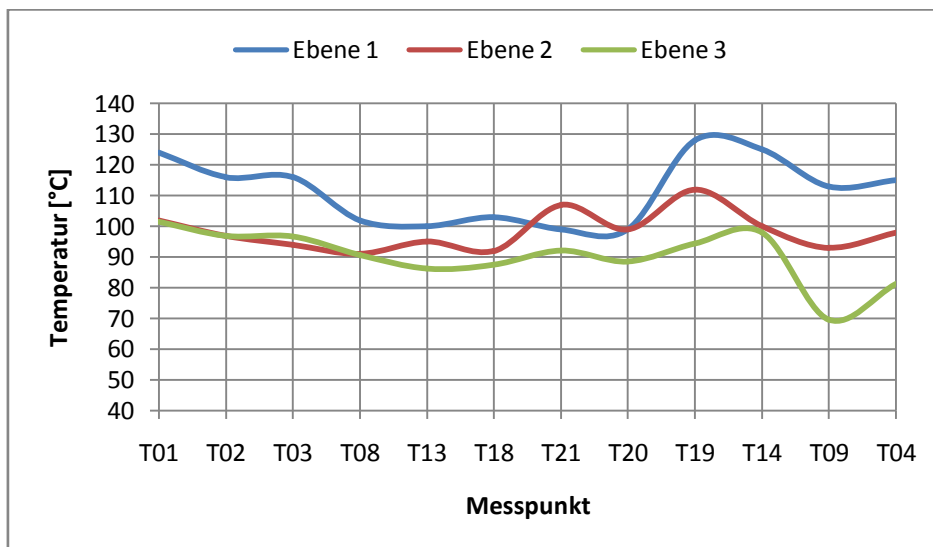


Die Temperatur ist abhängig vom Messpunkt. Für den Vergleich der Ebenen werden die äußeren und die inneren Messpunkte getrennt betrachtet. Die Abbildung 4.10 zeigt die Reihenfolge der Messpunkte in den beiden Kreisdiagrammen (Abbildung 4.11 und 4.12).



**Abbildung 4.10:** Skizze der Messpunkte in einer Ebene für die anschließenden „Kreisdiagramme“: Die äußeren und inneren Messpunkte werden getrennt betrachtet.

*Äußere Messpunkte (s. Abbildung 4.11):* Ebene 1 ist eindeutig wärmer als Ebene 3. Die Temperaturdifferenzen der Ebenen sind verschieden. Auffallend ist T09 mit einem Gradienten von über 40 °C, während am Spiegelpunkt T13 nur ein Gradient von etwa 10 °C vorliegt. Lediglich an diesen Messpunkten (T09, T13) und an T19 befindet sich die Temperatur von Ebene 2 mittig zwischen den Temperaturwerten von Ebene 1 und 3. Dass die Temperatur an Messpunkt T21 in Ebene 2 höher als in Ebene 1 ist, liegt vermutlich an der Messung.



**Abbildung 4.11:** „Kreisdiagramm“ mit äußeren Messpunkten zum Vergleich der Ebenen (offenes HLG 2)

*Innere Messpunkte (s. Abbildung 4.12):* Vier Messpunkte zeigen eine deutliche Temperaturdifferenz zwischen Ebene 1 und 3. Es handelt sich um die Messpunkte T07, T15 und T16 (ca. 20 °C) und T17, wobei dieser mit 25 °C den größten Gradienten präsentiert. Für die anderen fünf inneren Messpunkte weisen die Ebenen einen Temperaturunterschied von höchstens 5 °C auf. Deutlich ist eine Differenz von nahezu Null in T12 erkennbar.

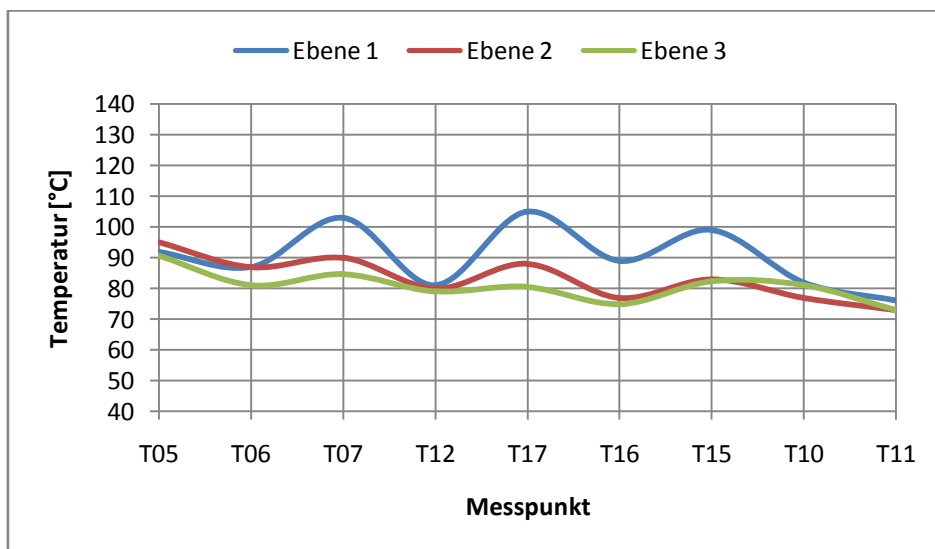


Abbildung 4.12: „Kreisdiagramm“ mit inneren Messpunkten zum Vergleich der Ebenen (offenes HLG 2)

### 120 °C-Einstellung und geschlossener Topf

In Ebene 1 (s. Abbildung 4.13) besitzt der Messpunkt T109c mit  $120\text{ °C} \pm 13\text{ °C}$  den höchsten Mittelwert. Im Zentrum am Messpunkt T111c ist die Temperatur am niedrigsten (88 °C). Dieser Temperaturunterschied von 32 °C liegt zwischen der linken Peripherie und der Mitte des Topfs vor. Von der Mitte zur rechten Peripherie beträgt der Unterschied 8 °C weniger.

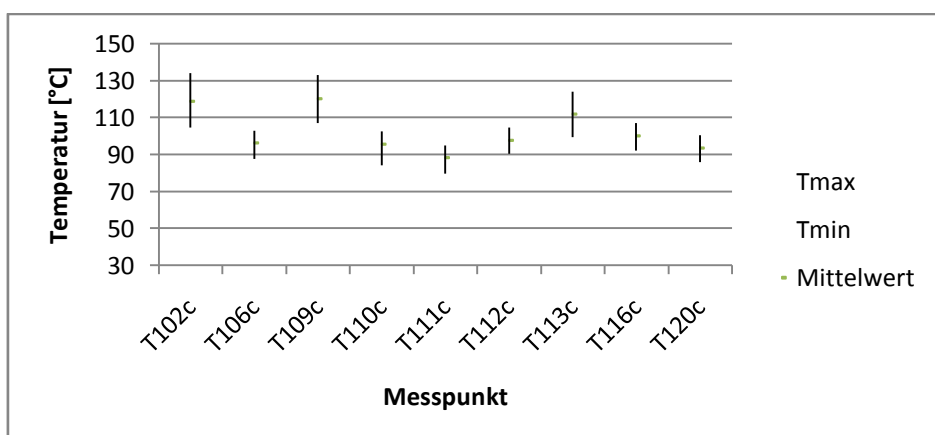
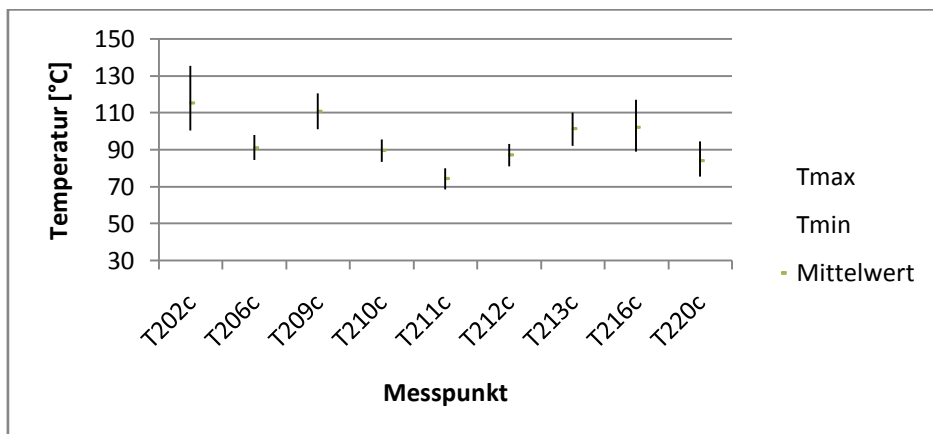


Abbildung 4.13: Spannweitendiagramm der Temperaturwerte in Ebene 1 (geschlossenes HLG 2): Das Diagramm zeigt die Temperatur in Abhängigkeit vom Ort in einem Zeitraum von 79 Sekunden. Für jeden Messpunkt wurde eine Messreihe aus 98 Messwerten mit Excel ausgewertet. Die ersten 19 Sekunden und somit die Aufwärmphase des Heißluftgeräts sind nicht enthalten.

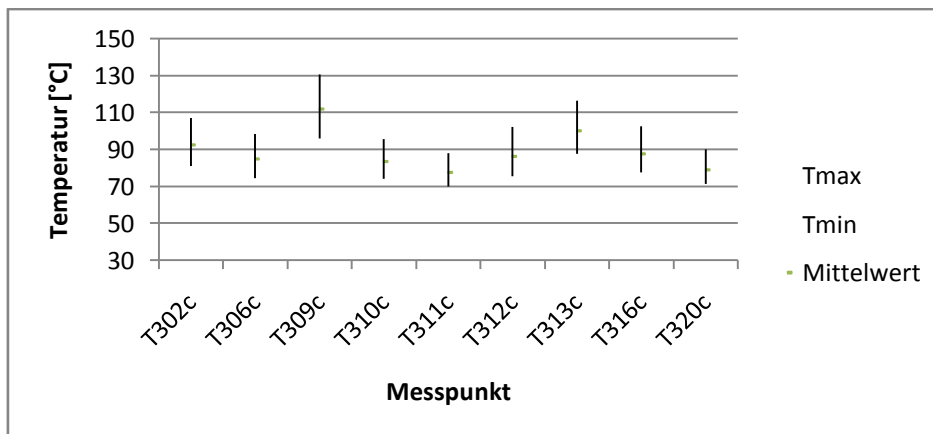
T102c erreicht die größte Temperaturspanne (29 °C). Die kleinste Spannweite (14 °C) weist T112c auf. Messpunkt T102c ist mit  $119\text{ °C} \pm 15\text{ °C}$  deutlich wärmer als sein Spiegelpunkt T120c mit  $94\text{ °C} \pm 7\text{ °C}$ . Durchschnittlich ergibt sich ein Wert von  $102\text{ °C}$  mit einer Standardabweichung von  $s = 12\text{ °C}$ .

In Ebene 2 (s. Abbildung 4.14) besitzt Messpunkt T202c mit  $115\text{ °C}$  den höchsten Mittelwert. Der niedrigste Mittelwert ( $75\text{ °C}$ ) ist zentral im Topf (T211). Es liegt zwischen dem kleinsten und dem größten Mittelwert eine Differenz von  $40\text{ °C}$  vor. Mit einer Spanne von  $35\text{ °C}$  ( $\pm 17,5\text{ °C}$ ) schwankt die Temperatur am Messpunkt T202c am stärksten. Mit ungefähr  $\pm 6\text{ °C}$  haben die zentralen Messpunkte die kleinsten Spannweiten. Die Durchschnittstemperatur in Ebene 2 beträgt  $96\text{ °C}$  mit einer Standardabweichung von  $s = 14\text{ °C}$ . Ebene 2 ist damit im Mittel  $6\text{ °C}$  kälter als Ebene 1.



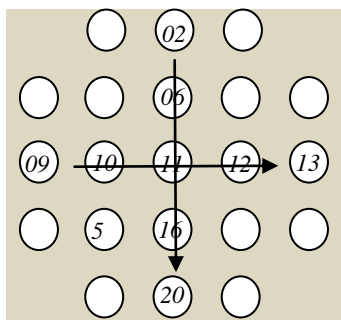
**Abbildung 4.14: Spannweitendiagramm der Temperaturwerte in Ebene 2 (geschlossenes HLG 2):** Das Diagramm zeigt die Temperatur in Abhängigkeit vom Ort in einem Zeitraum von 81 Sekunden. Für jeden Messpunkt wurde eine Messreihe aus 100 Messwerten mit Excel ausgewertet. Die ersten 19 Sekunden und somit die Aufwärmphase des Heißluftgeräts sind nicht enthalten.

In Ebene 3 (s. Abbildung 4.15) weist wie in Ebene 1 Messpunkte T309c den höchsten Mittelwerte auf ( $112\text{ °C} \pm 17\text{ °C}$ ), obwohl sich dort die linke Öffnung im Erwärmungstopf befindet. Der Messpunkt T311c hat einen Mittelwert von  $78\text{ °C} \pm 9\text{ °C}$ . Es entsteht zwischen dem kleinsten ( $73\text{ °C}$ ) und dem größten Mittelwert ( $101\text{ °C}$ ) eine Differenz von  $28\text{ °C}$ . Mit einer Spanne von  $34\text{ °C} (\pm 17\text{ °C})$  schwankt die Temperatur am Messpunkt T309c am stärksten. Die kleinsten Spannweiten in Ebene 3 ( $\pm 9\text{ °C}$ ) sind doppelt so groß wie in Ebene 2. Alle Mittelwerte der Messpunkte liegen weit unter dem eingestellten Temperaturwert von  $120\text{ °C}$ . Die Durchschnittstemperatur in Ebene 3 beträgt  $89\text{ °C}$  mit einer Standardabweichung von  $s = 11\text{ °C}$ . Damit ist Ebene 3 im Mittel  $7\text{ °C}$  kälter als Ebene 2 und  $13\text{ °C}$  kälter als Ebene 1.



**Abbildung 4.15: Spannweitendiagramm der Temperaturwerte in Ebene 3 (geschlossenes HLG 2):** Das Diagramm zeigt die Temperatur in Abhängigkeit vom Ort in einem Zeitraum von 131 Sekunden. Für jeden Messpunkt wurde eine Messreihe aus 150 Messwerten mit Excel ausgewertet. Die ersten 19 Sekunden und somit die Aufwärmphase des Heißluftgeräts sind nicht enthalten.

Für den Vergleich der Ebenen im geschlossenen Heißluftgerät werden die vertikalen und horizontalen Messpunkte getrennt betrachtet. Die Abbildung 4.16 zeigt die Reihenfolge der Messpunkte in den „Schnittdiagrammen“ der Abbildung 4.17 und 4.18.



**Abbildung 4.16: Skizze der Messpunkte in einer Ebene für die anschließenden „Schnittdiagramme“:** Die vertikalen und horizontalen Messpunkte werden getrennt verglichen.

*Vertikale Messpunkte (s. Abbildung 4.17):* Messpunkt T02c besitzt mit 115 °C in Ebene 2 und 119 °C in Ebene 1 die höchsten Temperaturwerte. Auffallend ist der große Temperaturunterschied zu Ebene 3, dort ist der Messpunkt mit 93 °C deutlich kühler (Differenz: 26 °C). Von den hinteren zu den zentralen Messpunkten fallen die Temperaturwerte stark ab und steigen zum peripheren Messpunkt T16c. Zum vordersten Messpunkt (T20c) sinken die Temperaturen wieder. Zwischen der hinteren Peripherie und dem Zentrum bestehen Temperaturunterschiede von 40 °C, während von der vorderen Peripherie zum Zentrum eine Differenz von 10 °C vorliegt. Ebene 2 weist die größten Schwankungen in der Temperatur auf. Die Ebenen 1 und 3 unterscheiden sich außer in T02c durch ihre fortwährende Temperaturdifferenz von etwa 10 °C. Die Temperaturlinie von Ebene 2 zeigt keinen gleichbleibenden Abstand zu den Ebenen 1 und 3. Ungefähr dieselbe Temperatur weisen Ebene 2 und 3 am Messpunkt T11c und Ebene 2 und 1 am Messpunkt T16c auf.

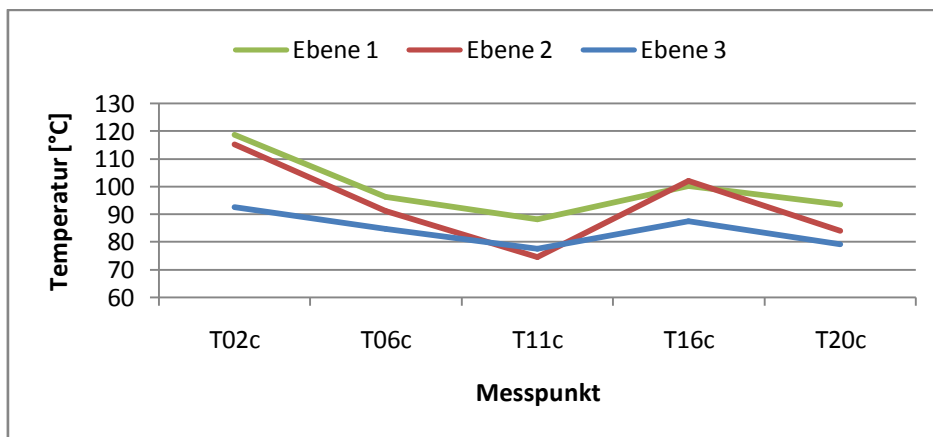


Abbildung 4.17: Vertikale Messpunkte zum Temperaturvergleich der Ebenen (geschlossenes HLG 2)

*Horizontale Messpunkte (s. Abbildung 4.18):* Von der linken Peripherie (T09c) zur Mitte (T11c) sinkt die Temperatur um 30 °C. Da es am rechten Rand des Topfs 10 °C kälter ist als am linken Rand, fällt die Temperatur von der rechten Peripherie zum Zentrum nur um 20 °C. Die Temperaturwerte von Ebene 2 und 3 unterscheiden sich nur gering voneinander. Ebene 1 ist relativ konstant 10 °C wärmer als Ebene 3.

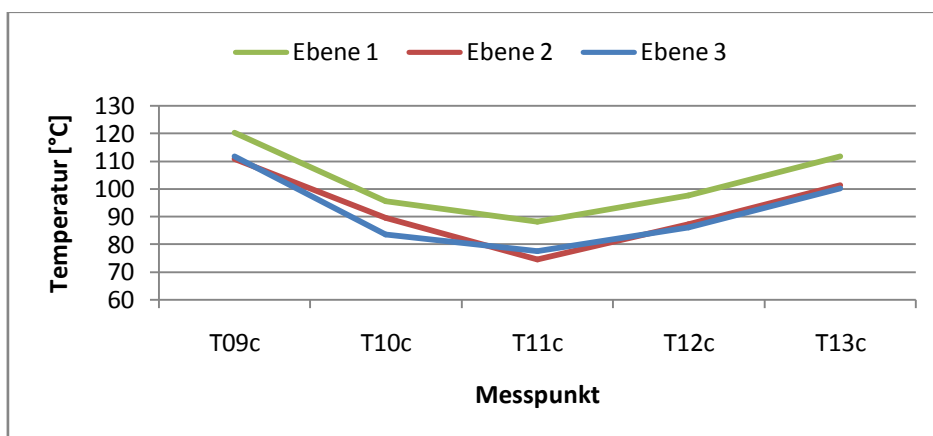


Abbildung 4.18: Horizontale Messpunkte zum Temperaturvergleich der Ebenen (geschlossenes HLG 2)

### Vergleich von offenem und geschlossenem HLG 2

In Ebene 1 erreichen die zentralen Messpunkte im geschlossenen Topf um etwa 10 °C höher Temperaturen als im offenen Topf (s. Abbildung 4.19 und 4.20). In der vorderen Peripherie (T20) sind die Temperaturen im offenen Gerät um 5 °C – 10 °C höher als im geschlossenen Gerät. In der hinteren Peripherie sind die Werte etwa gleich groß (s. Abbildung 4.19).

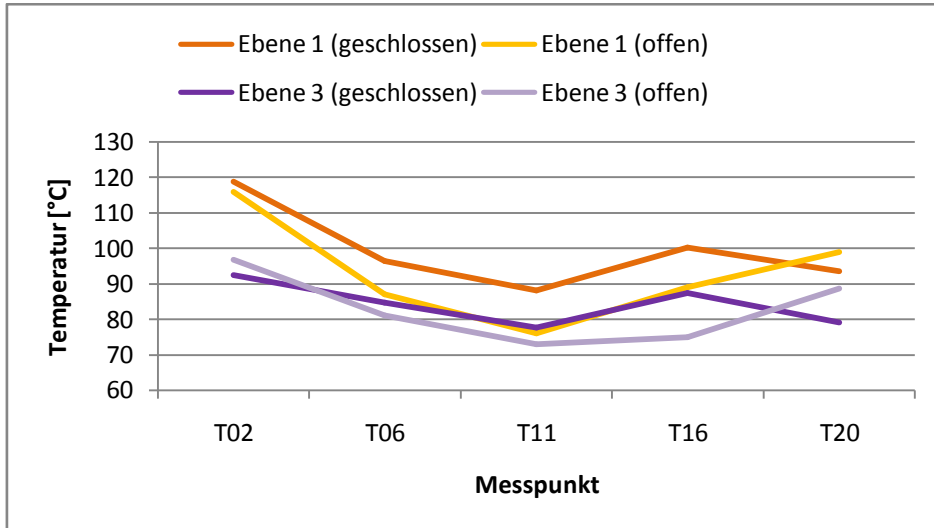


Abbildung 4.19: Vergleich des Temperaturverlaufs von offenem und geschlossenem HLG 2 (vertikale Messpunkte)

Ebene 3 im geschlossenen Topf ist zentral gering wärmer als Ebene 3 im offenen Topf. Am rechten und linken Rand des Topfs hingegen, wo der dieser jeweils eine Öffnung hat, ist Ebene 3 im geschlossen Topf eindeutig wärmer als Ebene 3 im offenen Topf, vor allem am Messpunkt T09 (s. Abbildung 4.20).

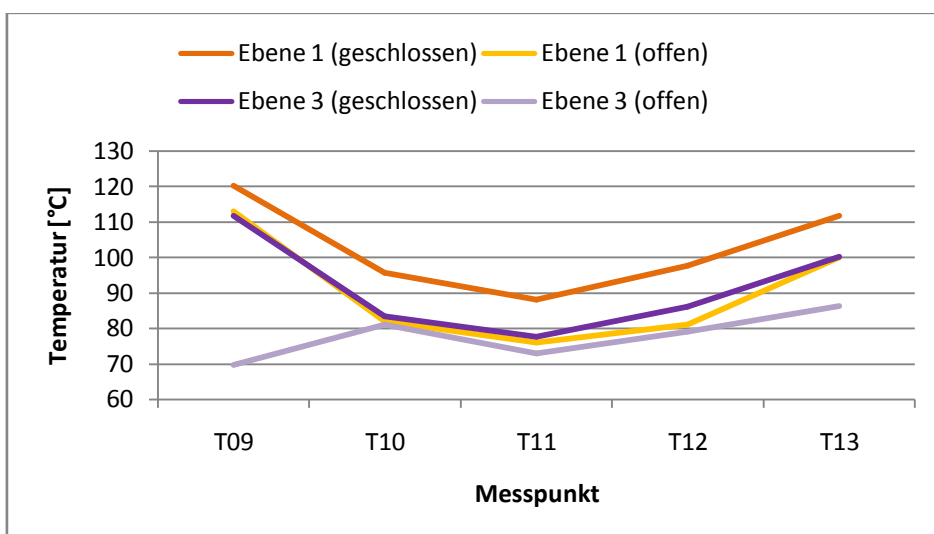
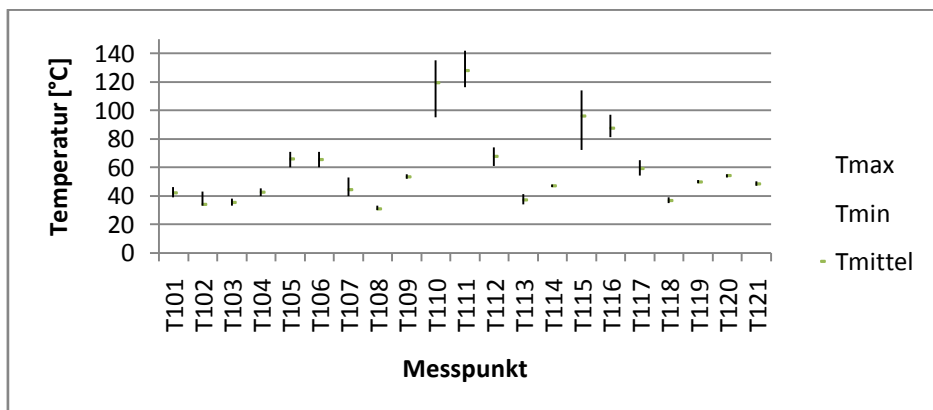


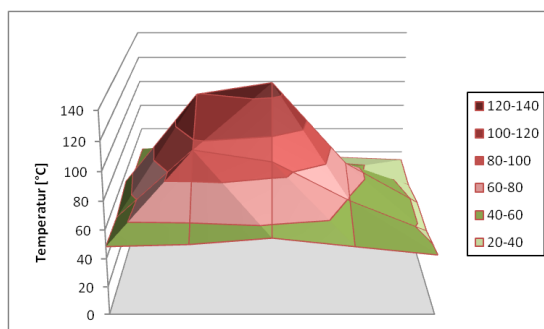
Abbildung 4.20: Vergleich des Temperaturverlaufs von offenem und geschlossenem HLG 2 (horizontale Messpunkte)

### 120°C-Einstellung, offener Topf und selbst konstruierte Siebabdeckung

Es ergeben sich vier Messpunkte mit hoher Temperatur und großer Spanne (s. Abbildung 4.21). Der Großteil der Luft strömt in der Mitte des Topfs an den Messpunkten T110 (120 °C) und T111 (128 °C) hoch. Die Spanne beträgt an den zentralen Messpunkten 40 °C (T110) und 26 °C (T111). Diese sind ähnlich hoch, wie die der äußeren Messpunkte der Messungen mit gewöhnlicher Siebabdeckung. Jedoch verzeichnen hier die äußeren Messpunkte einen durchschnittlichen Temperaturwert von nur  $48\text{ °C} \pm 12\text{ °C}$ . Das Regelverhalten des Temperatursensors ist an diesen Messpunkten nicht erkennbar. Da die warme Luft durch die Mitte des Erwärmungstopfes gerade nach oben hoch strömt, zeigen die äußeren Messpunkte keinen Temperaturanstieg. Somit entsteht zwischen den peripheren und den zentralen Messpunkten eine Temperaturdifferenz von über 100 °C (s. Abbildung 4.22). Das ermittelte dreidimensionale Temperaturbild des „Bergs“ ist gegenteilig zum Temperaturbild des unveränderten Heißluftgeräts, bei dem die Temperaturverteilung ein „Tal“ ergibt. Die gleichmäßig verteilten Öffnungen in der neuen Siebabdeckung erzielen zwar eine Veränderung der Temperaturverteilung im Erwärmungstopf, sie führen jedoch nicht zu einer Verbesserung der Situation. Das Ziel einer gleichmäßigen Temperaturverteilung im Topf wurde mit der neuen Siebabdeckung nicht erreicht. Dennoch lässt sich erkennen, dass die Anordnung und Anzahl der Öffnungen in der Siebabdeckung die Temperaturverteilung stark beeinflussen.



**Abbildung 4.21: Spannweitendiagramm der Temperaturwerte in Ebene 1 (offenes HLG 2, selbst konstruierte Siebabdeckung):** Aus den Datenreihen wurde mithilfe von Excel der Mittelwert errechnet, sowie der maximal und minimal aufgenommene Temperaturwert ermittelt.



**Abbildung 4.22: Dreidimensionale Darstellung der Temperaturverteilung in Ebene 2 mit selbst konstruierter Siebabdeckung (offenes HLG 2):** Durch die Temperaturunterschiede entsteht vom Rand (niedrige Temperaturen) zum Zentrum hin (hohe Temperaturen) ein „Berg“. Der Grund für die Verschiebung des Gipfels zur linken Seite ist womöglich ein nicht genau mittig zur Messstation zentriertes Heißluftgerät (Excel-Diagramm).

#### 75 °C-, 100 °C-, 140 °C- und 180 °C-Einstellung

*Peripherer Messpunkt T202c (s. Abbildung 4.23):* In der Peripherie wird bei den Temperatureinstellungen von 140 °C und 120 °C die eingestellte Temperatur mit dem Maximalwert erreicht, d. h. sie wird nicht überschritten. An T202c werden statt eingestellten 180 °C nur  $146\text{ °C} \pm 6\text{ °C}$  erreicht. Stellt man am Gerät eine Temperatur von 140 °C ein, so liegt der Mittelwert bei  $128\text{ °C} \pm 9\text{ °C}$ . Mit einer Temperatureinstellung von 120 °C beträgt der Mittelwert  $115\text{ °C} \pm 10\text{ °C}$ . Vorgewählte 100 °C ergeben die Temperaturmessungen einen Mittelwert von  $99\text{ °C} \pm 9\text{ °C}$ . Mit eingestellten 75 °C ergibt sich ein Mittelwert von  $75\text{ °C} \pm 8\text{ °C}$ .

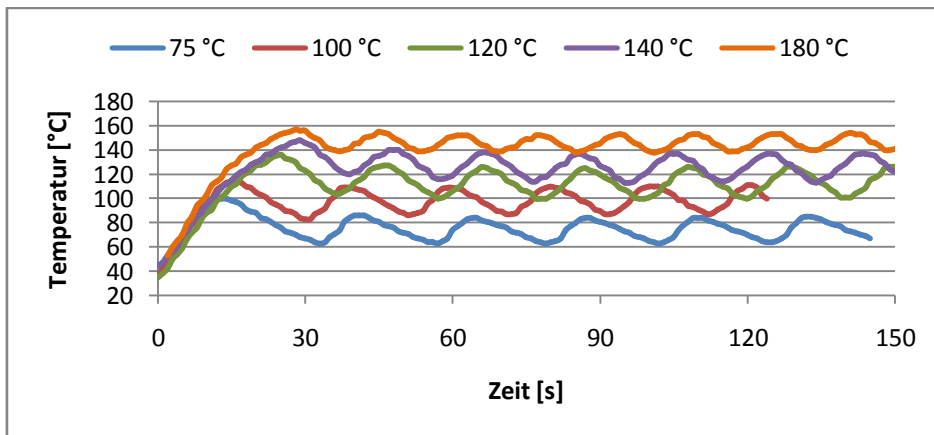


Abbildung 4.23: Temperaturverlauf am Messpunkt T202 bei verschiedenen Temperatureinstellungen (geschlossenes HLG 2)

*Zentraler Messpunkt T210c (s. Abbildung 4.24):* Zentral im Topf wird jede Temperatureinstellung unterschritten. Bei einer Temperatureinstellung von 180 °C beträgt die Temperatur nur  $110\text{ °C} \pm 2\text{ °C}$ . Mit vorgewählten 140 °C werden maximal 100 °C und mit eingestellten 100 °C maximal 80 °C erreicht. Die Einstellung von 75 °C ergibt eine maximale Temperatur von 60 °C.

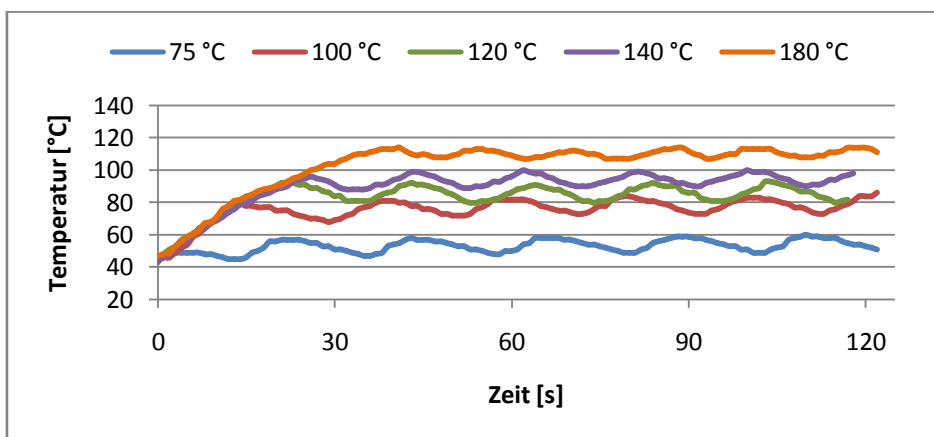
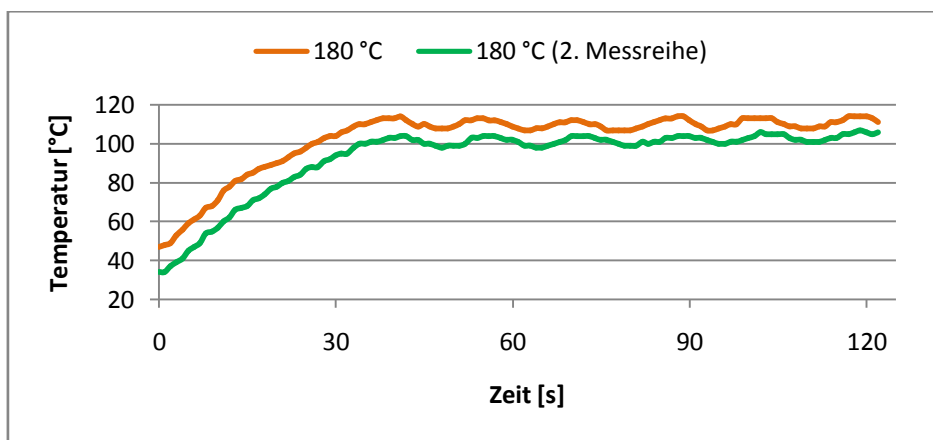


Abbildung 4.24: Temperaturverlauf im Messpunkt T210 bei verschiedenen Temperatureinstellungen (geschlossenes HLG 2)



Bei gleicher Ausgangssituation sind die Messwerte gut reproduzierbar. Es wurden z. B. Messungen mit einer Ausgangstemperatur<sup>7</sup> von  $45\text{ °C} \pm 5\text{ °C}$  durchgeführt. Die Messreihen sind für jeden Messpunkt weitestgehend deckungsgleich. Als Ursache von Abweichungen wird eine Überschwingweite des Reglers angenommen. Haben die Ausgangstemperaturen mit z. B.  $34\text{ °C}$  und  $47\text{ °C}$  unterschiedliche Werte, so liegen die Messreihen parallel verschoben (s. Abbildung 4.25). Die Differenz beträgt recht konstant  $13\text{ °C}$ . Eine höhere Ausgangstemperatur hat scheinbar einen höheren Temperaturverlauf zur Folge. Da in einem augenoptischen Geschäft die Heißluftgeräte verschiedene Ausgangssituationen aufweisen, ist eine Abhängigkeit der finalen von der anfänglichen Temperatur ungünstig. Das Gerät kann je nach Betriebsdauer und Einsatzhäufigkeit heiß, warm oder kalt sein.



**Abbildung 4.25: Reproduzierbarkeit der Temperaturen:** Im Messpunkt T210 bei geschlossenem Topf und  $180\text{ °C}$ -Einstellung wurden Messreihen bei unterschiedlichen Ausgangstemperaturen aufgenommen. Die Höhe des Temperaturverlaufs scheint von der Ausgangstemperatur abhängig zu sein.

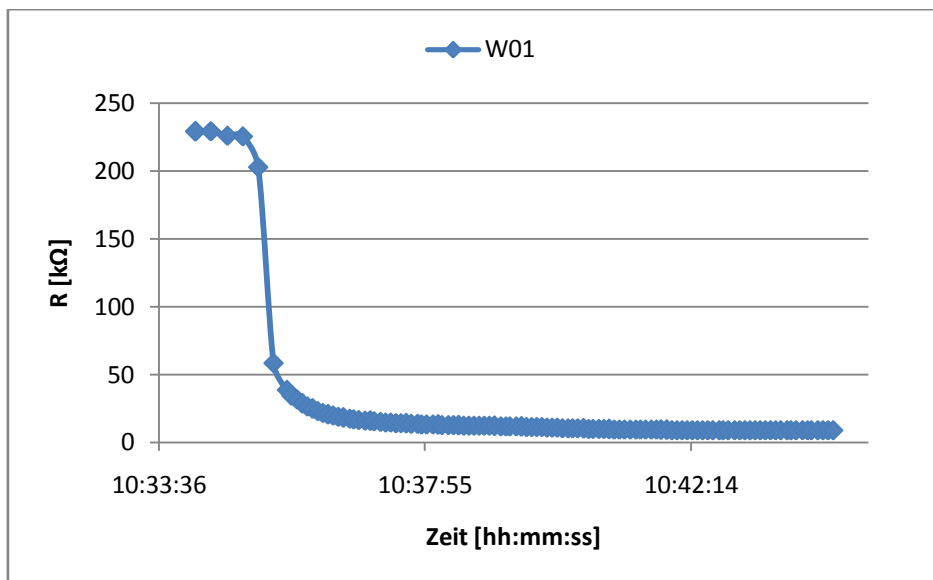
<sup>7</sup> Es handelt sich um die Temperatur im Erwärmungstopf zum Messzeitpunkt  $t = 0\text{ s}$ .

## 4.2 Widerstandsmessungen der Temperatursensoren

Bei dem im Heißluftgerät eingesetzten Temperatursensor handelt sich um einen Heißleiter. Der elektrische Widerstand  $R$  nimmt mit zunehmender Temperatur  $\vartheta$  ab.

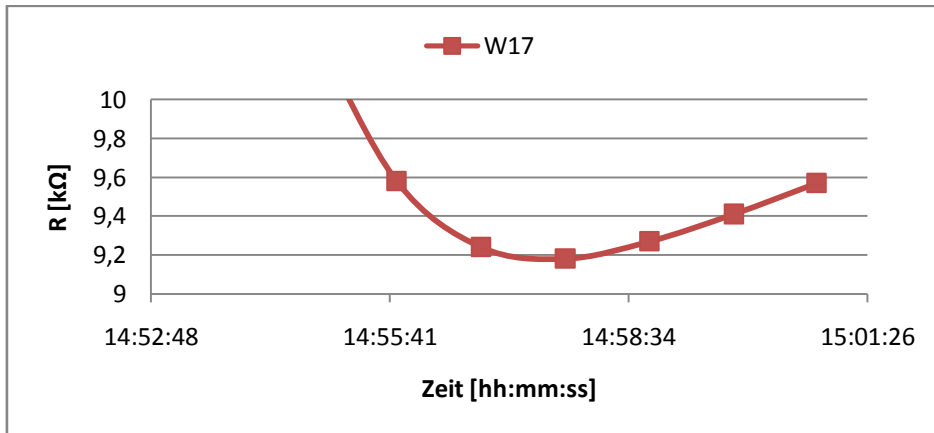
### Warmwert-Messung (100°C)

Nach dem Einlassen der Widerstände in den Wärmeschrank benötigen diese etwa sieben Minuten, bis sie einen stabilen Wert erreichen. Zu Beginn nimmt der Widerstand  $R$  innerhalb von wenigen Sekunden sehr schnell ab. Dann braucht es mehrere Minuten bis ein recht konstanter Wert erreicht ist. Um den zeitlichen Widerstandsverlauf zu zeigen, ist der Temperatursensor W01 in einem xy-Diagramm dargestellt (s. Abbildung 4.26). Da alle Temperatursensoren diesen Verlauf aufweisen, ist nur ein Widerstandsverlauf abgebildet. Der Widerstand W01 hat zu Beginn der Messung einen Widerstandswert  $R = 229 \text{ k}\Omega$ . Nach 15 Sekunden fällt der Wert auf  $203 \text{ k}\Omega$ . Mit  $8,82 \text{ k}\Omega \pm 0,01 \text{ k}\Omega$  erreicht der Widerstand nach acht Minuten einen stabilen Wert.



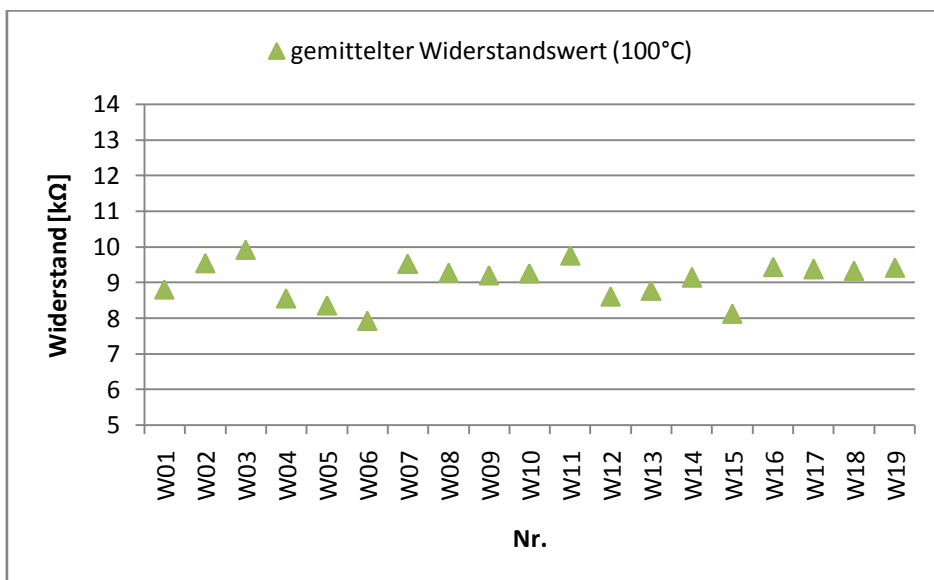
**Abbildung 4.26: Zeitlicher Widerstandsverlauf von Widerstand W01 nach dem Einführen in den Wärmeschrank (100°C):** Der elektrische Widerstand nimmt mit der Temperatur ab. Innerhalb von 15 Sekunden fällt der Widerstand von  $203 \text{ k}\Omega$  auf  $58,5 \text{ k}\Omega$  und nach weiteren 15 Sekunden um  $20 \text{ k}\Omega$  auf  $38,5 \text{ k}\Omega$ . Nach insgesamt 480 Sekunden hat sich der Wert stabilisiert.

Für eine genauere Betrachtung der Warmwerte demonstriert Abbildung 4.27 einen Ausschnitt der Datenreihe von Widerstand W17. Alle 19 Widerstände zeigen einen ähnlichen Verlauf. Der Warmwert erreicht einen Tiefpunkt und steigt wieder an.



**Abbildung 4.27: Warmwerte des Widerstands W17 im Wärmeschränk (100°C):** Die Anzahl der stabilen Messwerte beträgt  $n = 6$ . Der aus diesen errechnete durchschnittliche Warmwert beträgt für W17  $9,38 \text{ k}\Omega \pm 0,17 \text{ k}\Omega$ .

Es wird angenommen, dass der Verlauf durch Temperaturschwankungen im Wärmeschränk entsteht. Aus diesem Grund wurde für jeden Temperatursensor ein Durchschnittswert (arithmetisches Mittel) gebildet. Der Widerstand  $R$  liegt bei einer Temperatur von  $100^\circ\text{C}$  in einem Bereich von  $7 \text{ k}\Omega$  bis  $10 \text{ k}\Omega$  (s. Abbildung 4.28). Die 19 Widerstände streuen um einen Wert von  $\bar{x} = 9,08 \text{ k}\Omega$  mit einer Standardabweichung von  $s = 0,55 \text{ k}\Omega$ . Vergleicht man die Maximal- und Minimalwerte der 19 Temperatursensoren, so beträgt die Spanne  $2 \text{ k}\Omega$ , dabei ist  $R_{\max} = 9,93 \text{ k}\Omega$  und  $R_{\min} = 7,93 \text{ k}\Omega$ .



**Abbildung 4.28: Streuung der Widerstände bei  $100^\circ\text{C}$ :** Die Temperatursensoren streuen in einem Bereich von  $9,93 \text{ k}\Omega$  (W03) bis  $7,93 \text{ k}\Omega$  (W06).

### Kaltwert-Messung (24°C)

Im kalten Zustand liegt der Widerstandswert  $R$  in einem Bereich zwischen 186 k $\Omega$  und 200 k $\Omega$  (s. Abbildung 4.29). Die 19 Widerstände ergeben einen Mittelwert von  $\bar{x} = 190,19$  k $\Omega$ . Die Streuung der 19 Temperatursensoren ist bei 24 °C mit  $s = 3,56$  k $\Omega$  deutlich höher als bei 100 °C. Betrachtet man die höchsten und niedrigsten Werte, so ist  $R_{max} = 199,5$  k $\Omega$  und  $R_{min} = 186,4$  k $\Omega$ . Die Differenz der Werte ergibt eine Spanne von 13,1 k $\Omega$ .

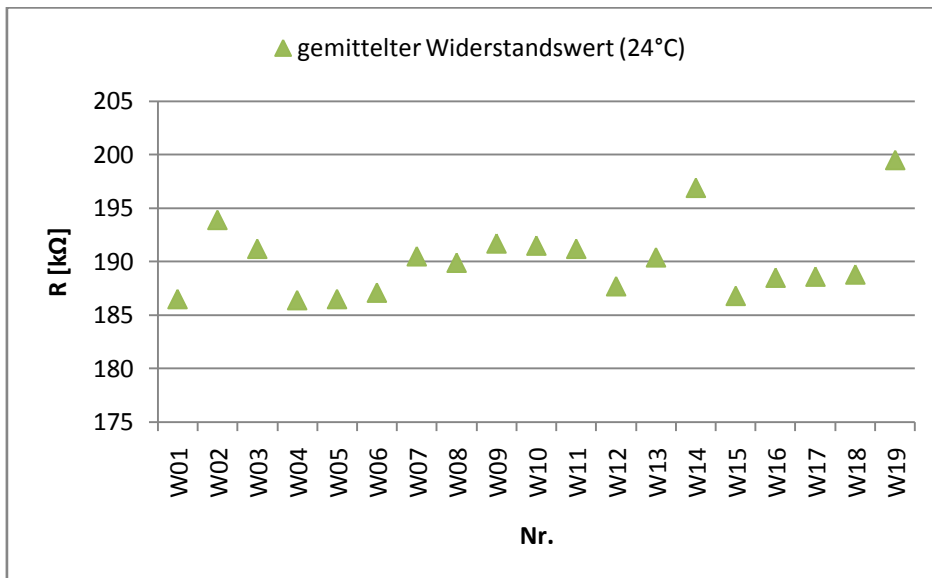


Abbildung 4.29: Streuung der Widerstände bei 24 °C: Die Temperatursensoren streuen von 199,5 k $\Omega$  (W19) bis 186,4 k $\Omega$  (W04).

## 4.3 Strömungsverhalten im Heißluftgerät

Es war mit den verschiedenen Siebabdeckungen ein unterschiedliches Strömungsverhalten erkennbar. Während bei der gewöhnlichen Siebabdeckung die Luft langsam ausströmte, sodass sich eine Nebelwolke im Heißluftgerät bilden konnte, strömte die Luft der selbst hergestellten Siebabdeckung zentral mit einem hohen Druck nach oben weg. Es bildete sich keine Wärmewolke im Topf. Wenn zentral keine Öffnungen vorliegen, wie bei der gewöhnlichen Siebabdeckung, wird die Luft dort abgebremst. Sie strömt mit einer geringeren Geschwindigkeit durch die peripheren Öffnungen. In Kauf genommen wird dabei eine zentral niedrigere Temperatur. Die Strömung ließ sich mit einer digitalen Kamera in Form von Fotos oder Videos nicht zufriedenstellend aufnehmen.

## 5 Diskussion

Die zentrale Aufgabe dieser Arbeit ist die Bestimmung der Eigenschaften eines Heißluftgeräts mit Temperaturregelung. Insbesondere werden die örtliche Verteilung und die zeitliche Konstanz der Temperatur im Erwärmungsraum untersucht. Diese Eigenschaften sind entscheidend für optimale Arbeitsergebnisse, sowie die Nutzerfreundlichkeit des Geräts in seiner praktischen Anwendung. Die meisten in Kapitel 2.2.3 beschriebenen Kunststoffe erweichen ab einer Temperatur von 90 °C – 100 °C. Wird für die Bearbeitung eines solchen Materials am Temperaturwahlschalter 100 °C eingestellt, sollte während des Erwärmungsvorgangs die vorgewählte Temperatur nicht mehr als 10 °C unterschritten werden, damit der Fassungswerkstoff bearbeitet werden kann. Auch soll die eingestellte Temperatur nicht wesentlich überschritten werden, da die Gefahr besteht, den Kunststoff zu überhitzen. Eine gleichmäßige örtliche Verteilung der Temperatur ist dann erreicht, wenn der Mittelwert der gemessenen Temperatur im Erwärmungstopf eine möglichst geringe Standardabweichung aufweist. Eine zeitlich konstante Temperatur ist dann gegeben, wenn die Schwankungsbreite der Temperatur möglichst klein ist. Eine definierte Temperatur ist dann erreicht, wenn die im Erwärmungstopf herrschende Temperatur mit der am Temperaturwahlknopf eingestellten Temperatur übereinstimmt. Da die Messungen an verschiedenen Tagen nacheinander durchgeführt wurden, könnten Messfehler durch ungleiche Messsituationen aufgetreten sein. Ebenfalls könnten Fehler durch eine ungenaue Justierung des Heißluftgeräts zur Messstation (Parallaxeneffekt) entstanden sein.

Für die Bestimmung der örtlichen Temperaturverteilung wurden die Temperaturen von 63 Messpunkten (21 Messpunkte in drei Ebenen) im Erwärmungstopf ausgewertet. Im Folgenden werden zuerst die 21 Messpunkte einer Ebene miteinander verglichen. Anschließend wird die Temperatur an einem der 21 Messpunkte in den drei Ebenen verglichen. Hierbei entspricht die unterste Ebene der Ebene 1. Die Messungen ergeben in allen Ebenen deutliche Temperaturdifferenzen zwischen der Peripherie und der Mitte des Erwärmungstopfs. Aber auch in der Peripherie unterscheiden sich die Werte der Messpunkte voneinander. Vergleicht man die Temperatur in einer Ebene, liegen die größten Differenzen in Ebene 1 vor. Mit einem Temperaturunterschied bis zu 52 °C im offenen Topf und 32 °C im geschlossenen Topf ist die Peripherie wärmer als das Zentrum. In Ebene 3 besteht eine maximale Differenz von 28 °C. Im augenoptischen Geschäft werden mit Heißluftgeräten unterschiedlich große Brillenfassungen erwärmt. Die Breite und Höhe des Fassungssteils variiert je nach Fassungstyp, z. B. Kinder- oder Erwachsenenbrillenfassung. Somit ist der Temperaturunterschied zwischen der Peripherie und dem Zentrum des Erwärmungsraums nicht vernachlässigbar. Es ergeben sich für die einzelnen Ebenen folgende Standardabweichungen der Temperatur: In Ebene 1 ist s

= 15 °C im offen und  $s = 12$  °C im geschlossen und in Ebene 2 ist  $s = 10$  °C im offen und  $s = 14$  °C im geschlossen Topf. Am geringsten sind die Abweichungen in Ebene 3 mit  $s = 9$  °C im offen und  $s = 11$  °C im geschlossen Topf. Vergleicht man nicht die Messpunkte in einer Ebene, sondern die senkrecht untereinander liegenden Messpunkte, so ergeben sich im offenen Topf folgende Unterschiede: Am Messpunkt T09, der sich peripher links befindet, ergibt sich die größte Temperaturdifferenz zwischen Ebene 1 und 3. Am Messpunkt T109 beträgt die Temperatur 113 °C, am Messpunkt T309 nur 70 °C. Der Messpunkt mit dem kleinsten Temperaturunterschied liegt zentral, aber nicht exakt in der Mitte. Es handelt sich um den Messpunkt T12. Am Messpunkt T112 beträgt die Temperatur 81 °C, am Messpunkt T312 79 °C. Bei geschlossenem Topf sind die Temperaturunterschiede der in den drei Ebenen untereinander liegenden Messpunkte deutlich geringer. Für fast alle Messpunkte ergab sich in Ebene 3 eine um 10 °C geringere Temperatur als in Ebene 1. Dieser Unterschied war beinahe konstant für alle Messpunkte. Im geschlossenen Topf sind der Temperaturunterschied vom Zentrum zur Peripherie und der Unterschied der Messpunkte zwischen den drei Ebenen geringer als im offenen Topf. Aus oben genannten Gründen rät sich an, das Gerät im geschlossenen Topf zu verwenden. Für eine noch sicherere und einfachere Bearbeitung der Kunststoffmaterialien wäre es wichtig, die örtlichen Temperaturunterschiede im Erwärmungstopf zu verringern.

Für die Bestimmung der zeitlichen Konstanz wurden die gleichen Messpunkte genutzt wie zuvor. An den definierten Orten wurde die Temperatur über einen Zeitraum von mindestens 100 Sekunden beobachtet. Die Messungen ergeben keine konstante Temperatur, sondern jeweils beinahe konstante Maxima und Minima mit einer Zeitdifferenz von 10 Sekunden. Am Rand des Topfs ist die Schwankungsbreite größer als zentral. Sie beträgt im Mittel etwa 20 °C. Für die Bearbeitung der sensiblen Kunststoffmaterialien wäre eine geringere Schwankungsbreite vorteilhaft. Eine Verkürzung des Intervalls wäre ebenfalls wünschenswert.

Für die Bestimmung der Definierbarkeit der Temperatur des Geräts wurden die Messungen bei geschlossenem Topf vorgenommen. Die vorgewählte Temperatur wurde mit dem Mittelwert aus neun Messpunkten der mittleren Ebene verglichen. Bei vorgewählter Einstellung am Temperaturwahlknopf auf 100 °C ergab die Auswertung der Messwerte einen Mittelwert von 81 °C mit einer Standardabweichung von 12 °C. Bei vorgewählten 140 °C ergab die Temperaturmessung einen Mittelwert von 105 °C mit einer Standardabweichung von 12 °C. Für eine Einstellung von 180 °C ergab die Temperaturmessung einen Mittelwert von 128 °C mit einer Standardabweichung von 22 °C. Für letztere Berechnung standen nicht neun Messpunkte, sondern zwei Messpunkte in der mittleren Ebene zur Verfügung. Die Temperatur ist durch den stufenlosen Wahlknopf für den Anwender variierbar, jedoch ist die Temperatur nicht optimal definiert. Die gemessene Temperatur unterschreitet regelmäßig den vorgewählten Wert. Der Verfasser sieht es als schwierig an, die Temperatur genauer zu definieren, solange die örtlichen

Unterschiede und die zeitlichen Schwankungen nicht reduziert sind. Der Ansatz einer Verbesserung des Geräts wird vom Verfasser weniger in einer Veränderung elektrischer Bauteile und elektronischer Steuerung gesehen, vielmehr in Ergänzung mechanischer Bauteile, die für ein geändertes Strömungsverhalten der erwärmten Luft im Erwärmungstopf sorgen.

## 6 Zusammenfassung

Heißluftgeräte kommen in den meisten augenoptischen Betrieben zum Einsatz, um Kunststoffbrillenfassungen zu verglasen und anatomisch anzupassen. Das Ziel der vorliegenden Arbeit war es zu analysieren, ob die am Gerät vorgewählte Temperatur mit der tatsächlich im Erwärmungsraum herrschenden Temperatur übereinstimmt. Die genaue Kenntnis hierüber ist für den Anwender des Geräts sehr wichtig, da viele Kunststoffmaterialien einen engen Bereich für die Erweichungstemperatur besitzen und bei einigen Materialien die Temperatur, bei der Überhitzung auftritt, nahe an der Erweichungstemperatur liegt. Für die Temperaturmessungen wurde der Erwärmungstopf des verwendeten Heißluftgeräts in drei Ebenen eingeteilt. In jeder der Ebenen befanden sich 21 Messpunkte. Die Anordnung ist in allen drei Ebenen die gleiche. Sie liegen also exakt übereinander. Die Messungen bei verschiedenen am Temperaturwahlknopf eingestellten Temperaturen zeigten, dass eine Definierbarkeit der Temperatur nicht gegeben war. Die örtliche Temperaturverteilung war ungleichmäßig. Es lagen zeitliche Abweichungen vor. Die zeitlichen Temperaturschwankungen können durch die Regelung des Temperatursensors verursacht, sowie aufgrund der Masse der Heizspirale (Trägheit) hervorgerufen werden. Auswirkungen von Veränderungen an diesen Bauteilen wurden in der vorliegenden Arbeit nicht untersucht. Vielmehr wurde festgestellt, dass die Siebabdeckung, die zwischen Heizspirale und den Erwärmungstopf liegt, für die Luftverteilung eine zentrale Rolle spielt. Die Heißluft wird, bevor sie in den Erwärmungstopf gelangt, durch die Öffnungen der Siebabdeckung kanalisiert. Die im Rahmen dieser Arbeit ermittelten Temperaturen haben gezeigt, dass mit der Verwendung einer neuen selbst konstruierten Siebabdeckung die örtliche Verteilung und die zeitliche Temperaturspanne verändert werden konnte. Allerdings führte diese vom Verfasser konstruierte Siebabdeckung nicht zu einer besseren Angleichung der Temperaturverteilung. In einer weiteren Studie wäre herauszufinden, welche Siebabdeckung das Strömungsverhalten positiver beeinflusst. Eine Idee des Verfassers ist, die durch die Siebabdeckung austretende Luft nochmals durch ein geeignetes Bauteil zu verwirbeln. Über dieses Bauteil sollte zum Schutz vor Kontakt mit Brillenfassungsteilen ein den Luftstrom gering beeinflussendes zusätzliches Gitter liegen. Würden durch diese Maßnahme die zeitliche und örtliche Abweichung verringert, wäre auch eine verbesserte Definierbarkeit realisierbar.

Zu dem jetzigen Zeitpunkt sollte der Anwender für die schonende und sichere Bearbeitung von Brillenfassungsteilen diese im Erwärmungstopf möglichst viel bewegen, um die Auswirkungen der örtlichen Temperaturunterschiede gering zu halten. Aufgrund der örtlichen und zeitlichen Schwankungen und der damit verbundenen unsicheren Definierbarkeit kann es bei der Benutzung des Geräts nötig sein, am Temperaturwahlknopf eine höhere Temperatur vorzuwählen, als es der Erweichungstemperatur des Materials



entspricht. Ebenso ist es bei ungünstigem Umstand nicht auszuschließen, dass es trotz Unterschreitung der Überhitzungstemperatur am Temperaturwahlknopf zu einer Beschädigung der Fassung kommt. Aus diesen Gründen ist ein gewisser Erfahrungswert vom Anwender nötig. Aufgrund der modernen Kunststoffmaterialien und der zukünftigen Materialien mit eventuell höheren Anforderungen, ist es aus der Sicht des Verfassers sinnvoll, auch ein so bewährtes Gerät, wie das in der Studie getestete, weiterzuentwickeln. Hierfür sind weitergehende Studien notwendig.

# Literatur

- [Boh2002] Bohn, H.: *Technologie für Augenoptiker: Ein Schulbuch und Leitfaden*. 2., überarb. Aufl. Heidelberg: Optische Fachveröffentlichung GmbH, Verlag der Deutschen Optikerzeitung, 2002.
- [DIN1997] DIN Deutsches Institut für Normung e.V. (Hrsg.): *Kunststoffe: Mechanische und thermische Eigenschaften, Prüfnormen*. 10. Aufl. Berlin; Wien; Zürich: Beuth, 1997, Band 1, S. 166.
- [Hei2005-1] Heinrich, B. (Hrsg.); Kaspers, W. (Begr.); Kufner, H.-J. (Begr.): *Kaspers/ Kufner, Messen – Steuern – Regeln, Elemente der Automatisierungstechnik*. 8., überarb. und erg. Aufl. Wiesbaden: Vieweg & Sohn Verlag, 2005, S. 29...32.
- [Hei2005-2] Heinrich, B. (Hrsg.); Kaspers, W. (Begr.); Kuefner, H.-J. (Begr.): *Kaspers/ Kufner, Messen – Steuern – Regeln, Elemente der Automatisierungstechnik*. 8., überarb. und erg. Aufl. Wiesbaden: Vieweg & Sohn Verlag, 2005, S. 245.
- [Hof2007-1] Hoffmann, J. (Hrsg.): *Taschenbuch der Messtechnik*. 5., aktualisierte Aufl. München: Fachbuchverlag Leipzig im Carl Hanser Verlag, 2007, S. 29.
- [Hof2007-2] Hoffmann, J. (Hrsg.): *Taschenbuch der Messtechnik*. 5., aktualisierte Aufl. München: Fachbuchverlag Leipzig im Carl Hanser Verlag, 2007, S. 136.
- [Hof2007-3] Hoffmann, J. (Hrsg.): *Taschenbuch der Messtechnik*. 5., aktualisierte Aufl. München: Fachbuchverlag Leipzig im Carl Hanser Verlag, 2007, S. 17.
- [Hof2007-4] Hoffmann, J. (Hrsg.): *Taschenbuch der Messtechnik*. 5., aktualisierte Aufl. München: Fachbuchverlag Leipzig im Carl Hanser Verlag, 2007, S. 61.
- [Hof2007-5] Hoffmann, J. (Hrsg.): *Taschenbuch der Messtechnik*. 5., aktualisierte Aufl. München: Fachbuchverlag Leipzig im Carl Hanser Verlag, 2007, S. 130...131.
- [Kas1984-1] Kaspers W.; Kufner, H.-J.: *Messen Steuern Regeln*. 3., neubearb. und erw. Aufl. Braunschweig/Wiesbaden: Vieweg & Sohn Verlag, 1984, S. 270.
- [Kas1984-2] Kaspers W.; Kufner, H.-J.: *Messen Steuern Regeln*. 3., neubearb. und erw. Aufl. Braunschweig/Wiesbaden: Vieweg & Sohn Verlag, 1984, S. 267.

- [Kle1997] Klein, M.: *Einführung in die DIN-Normen*. 12., neuerarb. und erw. Aufl. DIN Deutsches Institut für Normung e.V. (Hrsg.). Bearb. von K. G. Krieg, Stuttgart; Leipzig; Teubner; Berlin; Wien; Zürich: Beuth, 1997, S. 533.
- [Loo2010] Look, A.; Bliedtner J.: *Grundlagen Optik und Technologien in der Augenoptik*. Jena: Verlag Fachhochschule Jena, 2010.
- [Mar2007] Marek, R.; Nitsche, K.: *Praxis der Wärmeübertragung, Grundlagen – Anwendungen – Übungsaufgaben*. München: Carl Hanser Verlag, 2007, S. 15...19.
- [Nor1996] Norm DIN EN ISO 75-2: Kunststoffe – Bestimmung der Wärmeformbeständigkeitstemperatur – Teil 2: Kunststoffe und Hartgummi (ISO 75-2: 1993); Deutsche Fassung EN ISO 75-2: 1996.
- [Nor1994] Norm DIN 1304-1: Formelzeichen – Allgemeine Formelzeichen (März 1994).
- [Nor2009] Norm DIN EN ISO 11357-1: Kunststoffe – Dynamische Differenz-Thermoanalyse (DSC) – Teil 1: Allgemeine Grundlagen (ISO 11357-1: 2009); Deutsche Fassung EN ISO 11357-1: 2009.
- [Par2010-1] Parthier R.: *Messtechnik: Grundlagen und Anwendungen der elektrischen Messtechnik für alle technischen Fachrichtungen und Wirtschaftsingenieure*. 5., erw. Aufl. Wiesbaden: Vieweg + Teubner, 2010, S. 169.
- [Par2010-2] Parthier R.: *Messtechnik: Grundlagen und Anwendungen der elektrischen Messtechnik für alle technischen Fachrichtungen und Wirtschaftsingenieure*. 5., erw. Aufl. Wiesbaden: Vieweg + Teubner, 2010, S. 170.
- [Pes2009] Pesch, B.: *Messen, Kalibrieren, Prüfen: Messungen planen, durchführen, bewerten, optimieren und dokumentieren*. Zülrich: Books On Demand GmbH, 2009, S. 42.
- [Che2011] chemie-master.de – Website für den Chemieunterricht  
URL: <http://www.chemie-master.de/>  
Online-Abfrage: 15. November 2011
- [Phy2011] Physikalisch-Technische Bundesanstalt (PTB)  
URL: <http://www.ptb.de/>  
Online-Abfrage: 15. November 2011

## **Eidesstattliche Erklärung**

Hiermit erkläre ich, dass ich die Bachelorarbeit selbstständig verfasst und keine anderen als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel benutzt und die aus fremden Quellen direkt oder indirekt übernommenen Gedanken als solche kenntlich gemacht habe. Die Bachelorarbeit habe ich bisher keinem anderen Prüfungsamt in gleicher oder vergleichbarer Form vorgelegt. Sie wurde bisher auch nicht veröffentlicht.

Meckel, den 28. Februar 2012

Kristin Grewenig